

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL A PARTIR DE INFORMACIÓN
SECUNDARIA, EN LOS ALREDEDORES DEL CENTRO URBANO DEL MUNICIPIO
DE CHIQUINQUIRÁ.**

VICTOR MANUEL PERDOMO MELO

CARLOS ARTURO ROJAS LEGUIZAMÓN

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2017

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL A PARTIR DE
INFORMACIÓN SECUNDARIA, EN LOS ALREDEDORES DEL CENTRO URBANO
DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ**

VICTOR MANUEL PERDOMO MELO

CARLOS ARTURO ROJAS LEGUIZAMÓN

Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.

ASESOR: EDGAR OBANDO GARNICA

INGENIERO CIVIL, MSC.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2017



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., Diciembre de 2017.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi familia, en especial a mis padres, quienes han sido el apoyo incondicional de toda mi vida y a Fiorella quien llegó al mundo a darnos una nueva esperanza de vida.

Victor Perdomo.

Este trabajo lo dedico a mi Padre que desde el cielo me acompaña en mi caminar, a mi madre que con su amor me fortalece, a mi esposa que sostiene mis pasos, a mi hija Sara Isabella que me da la fuerza para avanzar, a mi Tía Estrella por su apoyo incondicional.

Carlos Arturo.

Agradecimientos

Agradecimientos especiales al Geólogo Fabio Garavito por su asesoría técnica y su buena disposición y a los profesores de la especialización que nos ofrecieron sus conocimientos y experiencia enriqueciendo nuestro perfil profesional.

Agradecimientos especiales al Ingeniero Edgar Obando por su comprensión y su buena disposición para llegar a feliz término de este documento.

Gracias a la vida por permitirnos gozar del privilegio de desarrollarnos como profesionales integrales.

TABLA DE CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN	13
1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO.	15
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2.1 Antecedentes del problema.....	16
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.4 OBJETIVOS.....	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
2 MARCOS DE REFERENCIA	20
2.1 MARCO TEÓRICO	20
2.2 ESTADO DEL ARTE	24
3 METODOLOGÍA.....	26
3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO	26
4 MODELO GEOLÓGICO	28
4.1 ESTRATIGRAFÍA.....	28
4.1.1 Cretácico.....	28
4.1.2 Cuaternario.	29
4.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.	30
4.3 GEOFISICA	32
4.4 HIDROGEOLOGIA	32
4.5 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	34
5 BALANCE HIDRICO SUBSUPERFICIAL	36
5.1 PLUVIOSIDAD.....	36
5.2 LA FRACCIÓN DE LLUVIA INTERCEPTADA POR EL FOLLAJE.....	40
5.2.1 RETENCION POR FOLLAJE.....	40
5.3 INFILTRACIÓN.....	40

5.4	FRACCIÓN QUE INFILTRA POR EFECTO DE PENDIENTE.	42
5.5	FRACCIÓN QUE INFILTRA POR COBERTURA VEGETAL.	43
5.6	COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN	44
5.7	INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL.....	45
5.8	ESCORRENTIA SUPERFICIAL	48
5.9	EVAPOTRANSPIRACION	53
5.10	RECARGA POTENCIAL DEL ACUIFERO	54
6	MODELO HIDRAULICO	58
6.1	PRUEBAS DE BOMBEO.....	58
7	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	61
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
8	BIBLIOGRAFÍA	65
	APÉNDICES.....	67
	ANEXOS	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE PLEGAMIENTO DE LAS ROCAS.....	22
FIGURA 2 CICLO HIDROLÓGICO.	24
FIGURA 3. MAPA GEOLÓGICO.....	31
FIGURA 4 PERFIL GEOFÍSICO.....	32
FIGURA 5. MAPA HIDROGEOLÓGICO.....	35
FIGURA 6. PLUVIOSIDADES MENSUALES POR ESTACIONES.....	37
FIGURA 7 PLUVIOSIDAD ANUAL.....	38
FIGURA 8. PLUVIOSIDAD MENSUAL.....	39
FIGURA 9. MAPA COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR TEXTURA DEL SUELO.	41
FIGURA 10 MAPA COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR EFECTO DE PENDIENTE	42
FIGURA 11. MAPA COEFICIENTE POR COBERTURA VEGETAL.	43
FIGURA 12. MAPA COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN.	44
FIGURA 13 MAPA POTENCIAL DE INFILTRACIÓN.	46
FIGURA 14. MOSAICO INFILTRACIÓN MENSUAL.	47
FIGURA 15. ESCORRENTÍA PROMEDIO MENSUAL.....	50
FIGURA 16 ESCORRENTÍA VS EVAPOTRANSPIRACIÓN.	51
FIGURA 17. ESCORRENTÍA ANUAL.	52
FIGURA 18. PRECIPITACIÓN VS EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	53
FIGURA 19 BALANCE HÍDRICO SUBSUPERFICIAL.	55
FIGURA 20. MAPA RECARGA POTENCIAL ANUAL	56
FIGURA 21. PRUEBA DE BOMBEO.	59
FIGURA 22. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	62
FIGURA 23. PERFIL GEOLGICO.	62

LISTA DE TABLAS

<i>TABLA 1 ÁREA DE LAS FORMACIONES</i>	<i>57</i>
<i>TABLA 2 INFILTRACIÓN ANUAL.....</i>	<i>57</i>
<i>TABLA 3 VOLUMEN DE RECARGA.....</i>	<i>57</i>
<i>TABLA 4 PROPIEDADES HIDRÁULICAS</i>	<i>60</i>

RESUMEN

Palabras clave: Modelo Hidrogeológico conceptual, Modelo Geológico, Modelo Hidrológico, Acuíferos, Pruebas de bombeo.

Para entender la circulación del agua subterránea en el subsuelo se necesita definir un modelo Hidrogeológico Conceptual, que permita identificar las condiciones de recarga y descarga de agua, las características litológicas y geométricas de la roca acuífero, las secuencias estratigráficas, y las respectivas condiciones hidrogeológicas tales como: direcciones de flujo del agua subterránea, gradientes hidráulicos, transmisividad de la roca, su coeficiente de almacenamiento, capacidad específica, entre otras. El modelo hidrogeológico conceptual es un esquema lógico a nivel cualitativo y cuantitativo, que describe las propiedades, condiciones, procesos y potencialidades de la roca acuífero, intentando predecir su comportamiento para así determinar la cantidad de recurso hídrico que es susceptible a infiltración, al mismo tiempo se pueden anticipar y explicar posibles impactos ambientales sobre el sistema hídrico subterráneo.

ABSTRACT

Keywords: Hydrogeological Conceptual Model, Geological Model, Hydrological Model, Aquifers, Pump Test.

To understand subterranean water circulation, in subsoil is necessary to define an Hydrogeological Conceptual Model to identify water recharging and discharging areas, the geometrical and lithological features of the rocks, and the stratigraphical sequences and the Hydrogeological terms such as, directions of groundwater flow, hydraulic gradients, transmissivity, storage coefficient, specific capacity. The Hydrogeological Conceptual Model is a logical scheme at a qualitative and quantitative level, which describes, properties, conditions, processes and potentialities of aquifers rocks, trying to predict his behavior to determine the amount of water that can infiltrate and at the same time explain environmental impacts concerning to the underground water system.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto se presenta como un ejercicio y una ayuda para la gestión integrada del recurso hídrico en este caso subterráneo en la zona del municipio de Chiquinquirá, departamento de Boyacá, siendo el agua un elemento vital que hace parte de la estructura y del andamiaje social, productivo y económico de cualquier región, sin la cual se obstaculiza el normal desarrollo de gran parte de las actividades presentes en un centro poblado cualquiera.

La zona de estudio se enmarca en el municipio de Chiquinquirá Boyacá, el cual se encuentra ubicado en la provincia hidrogeológica montana e intramontana de la zona de la Cordillera Oriental, del sistema acuífero Ubaté-Chiquinquirá. Esta se determinó más por los límites geológicos, muchas veces estos límites no son coincidentes con límites fisiográficos ni hidrográficos.

El estudio se enfocó hacia la determinación de la potencialidad de recarga de agua a los acuíferos, al mismo tiempo se cuantificó la cantidad de recurso hídrico disponible como recarga potencial hacia los acuíferos, el cual servirá para subsanar los déficits acaecidos por temporadas de sequías.

La Hidrogeología de la zona se encuentra enmarcada por la expresión (Geomorfológica-Estructural) del sinclinal de Chiquinquirá, siendo esta geoforma un acomodamiento de excelentes características para el almacenamiento de agua subterránea, aunado a esto formaciones que tienen capacidad de alojar agua tales como: La Formación Conejo, la cual presenta porosidad secundaria, la Formación Areniscas de Chiquinquirá y los sedimentos del Cuaternario que presentan porosidad primaria.

Este modelo se realizó a partir de datos como; mapas geológicos, datos climatológicos de las estaciones meteorológicas, datos de pozos perforados para captación de agua, cobertura vegetal, tipos de suelo, pendientes del terreno y datos geográficos.

A partir de estos datos se realizaron mapas con las propiedades y características necesarias, expresándolas de manera numérica para poder cuantificar la influencia de estas en el balance hídrico del subsuelo, obteniendo como resultado un mapa de recarga potencial anual, mostrando las zonas con mayor posibilidad de recarga, así calculando un aproximado del volumen total anual de infiltración.

Se clasificaron e identificaron las Formaciones geológicas e hidrogeológicas de la zona, realizando un modelo de flujo del agua subterránea, así como de superficie, a partir del estudio de la geomorfología y la geología estructural de la zona.

1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO.

1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

Este estudio tiene como principal línea de investigación la Hidrogeología, además el saneamiento básico, teniendo en cuenta que los resultados pueden ayudar a definir zonas de prospectividad de aguas subterráneas, para aliviar el problema de falta de agua en el municipio de Chiquinquirá.

La hidrogeología puede definirse como: "aquella parte de la hidrología que estudia el almacenamiento, la circulación y la distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre". (Otalvaro, 1999)

Según la OMS, el saneamiento básico es: “La tecnología de más bajo costo que permite eliminar higiénicamente las excretas y aguas residuales y tener un medio ambiente limpio y sano tanto en la vivienda como en las proximidades de los usuarios. El acceso al saneamiento básico comprende seguridad y privacidad en el uso de estos servicios. La cobertura se refiere al porcentaje de personas que utilizan mejores servicios de saneamiento, a saber: conexión a alcantarillas públicas; conexión a sistemas sépticos; letrina de sifón; letrina de pozo sencilla; letrina de pozo con ventilación mejorada y acceso al recurso hídrico”.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La oferta Hídrica es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y haber satisfecho la evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y otras corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar. Usualmente esta porción de agua que escurre por los ríos es denominada como escorrentía superficial y cuantificarla conforma el elemento principal en la medición de las redes de seguimiento hidrológico existentes.

La oferta hídrica de una cuenca, corresponde también al volumen disponible de agua para satisfacer la demanda para el uso del hombre, tanto para actividades económicas como la mínima vital. Al cuantificar la escurrimiento superficial realizando el balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua superficial de la misma, entendiendo el caudal del río, su confiabilidad y extensión a partir de las series de registros históricos las cuales son las variables que pueden influir en la estimación de la oferta hídrica superficial. Con esta información se puede estimar el caudal medio anual del río el cual se puede presumir como la oferta hídrica de la cuenca.

1.2.1 Antecedentes del problema

El municipio de Chiquinquirá se ha visto afectado en el suministro de agua en tiempos de sequía, debido a esto las entidades públicas del municipio como la CAR y Empochiquinquirá han desarrollado algunos estudios acerca del comportamiento de las aguas subterráneas en el sector que ayuden a buscar una solución a este problema. A continuación se mencionan algunos:

Con el cambio climático, los tiempos secos se hacen cada vez más intensos y prolongados, a su vez los tiempos lluviosos son de menor duración pero de mayor intensidad, por consiguiente las fuentes de agua superficiales son más escasas y obligan a buscar otras fuentes de abastecimiento como las aguas subterráneas. Las aguas subterráneas en Colombia jugarán en el futuro un papel de enorme importancia, bien sea como una alternativa tecnológica para la explotación del recurso en áreas donde su costo pueda competir con la utilización de agua superficial, o como única alternativa disponible en regiones donde el balance demanda-disponibilidad presente situaciones críticas.

Además las pluviosidades en los alrededores del casco urbano no son suficientes para la demanda existente, sumándose a esto que la infraestructura actual del acueducto no es la más óptima para la densidad demográfica existente en la población.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El ciclo del agua implica un cambio continuo de grandes masas de agua de un estado físico a otro y su transporte de un lugar a otro, a este volumen de agua que se desplaza de un depósito a otro a lo largo de un año se le denomina Balance Hídrico Global, teniendo en cuenta que el factor antrópico ha alterado este ciclo generando cambios en algunas partes sustanciales afectando el ciclo natural del agua, se hace necesario acudir al recurso hídrico subterráneo para subsanar las necesidades de agua generadas por la alteración del ciclo hidrológico.

En los periodos de sequía los habitantes del centro urbano del municipio de Chiquinquirá, se ven afectados por la falta del líquido vital. Este estudio conceptuó el comportamiento de flujo del agua subterránea, identificando zonas de recarga, descarga y capacidad de almacenamiento, con el fin de brindar una orientación a los interesados para una gestión adecuada y sostenible del recurso hídrico subterráneo.

El presente trabajo se orientó en el desarrollo de un Modelo Hidrogeológico Conceptual, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá, a partir de la información secundaria existente. Desde el punto de vista académico es un ejercicio para la aplicación de los conocimientos adquiridos durante el curso de la especialización en Recursos Hídricos, integrando diferentes disciplinas, obteniendo una visión general de la generación de un Modelo Hidrogeológico Conceptual de un sitio cualquiera.

Se hace necesario para el país, que existan profesionales competentes en el estudio y conocimiento del agua subterránea, debido a que es una solución casi inmediata para solventar los conflictos por el uso del agua, el cual se está reflejando en todas las zonas del país, tanto por la variación y variabilidad climática, como por los múltiples malos usos, siendo el factor antrópico el de mayor afectación al ciclo hidrológico.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Generar un Modelo Hidrogeológico Conceptual, cuantificando la recarga potencial de las rocas acuíferas presentes en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar información secundaria en las áreas de Geología, Geofísica, Hidrología, e Hidráulica, en las entidades ambientales como la CAR, planeación Municipal, IDEAM y entidades privadas.
- Clasificar la información recopilada con el fin de sistematizarla y evaluarla.
- Generar un modelo Geológico, para así identificar los tipos de litología y la capacidad de almacenamiento de agua de cada unidad de roca.
- Realizar el Balance Hídrico Subsuperficial de la zona para obtener la recarga potencial, teniendo en cuenta los factores que influyen en la infiltración del agua en las rocas acuíferas presente.
- A partir del balance Hídrico Subsuperficial delimitar las zonas de almacenamiento con potencialidad de extracción del recurso hídrico.
- Reconocer la distribución dinámica del flujo, identificando zonas de recarga, de tránsito y de descarga, mediante la elaboración del modelo Geológico e Hidrogeológico.

- Integrar la información Geológica, Hidrológica e Hidráulica, con el fin de generar un modelo Hidrogeológico Conceptual, en el cual se explicará el comportamiento del agua subterránea en el área delimitada cercana al municipio de Chiquinquirá.
- Definir la distribución de las unidades hidroestratigráficas y sus propiedades Hidrogeológicas.

2 MARCOS DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO

Un modelo Hidrogeológico Conceptual se genera a partir de la combinación de los siguientes modelos: Hidrogeológico, Hidrológico, Hidráulico y Geoquímico, este último no fue abordado debido a la falta de datos e información.

Un modelo Geológico básico es el principal armazón del MHC, en este se delimitan las unidades con potencial hidrogeológico, y se realiza un perfil del subsuelo en el que se define espesor y contactos de las formaciones geológicas.

Los modelos Hidrogeológicos Conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterránea en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada. (<http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>).

Para la realización de un Modelo Hidrogeológico Conceptual o (MHC), es necesario realizar la integración del consolidado de las evaluaciones Geológicas, Hidráulicas e Hidrológicas, las cuales son los componentes más importantes.

Cada una de estas evaluaciones se obtiene a partir de parámetros singulares, que a su vez consolidan y complementan la estructura del Modelo Hidrogeológico Conceptual, es necesario aclarar que algunos de estos parámetros fueron tomados de información ya existente, debido principalmente al costo de consecución de la misma.

A partir de esto desglosaremos los principales conceptos; Modelo Geológico y Balance Hídrico Subsuperficial, relacionados con la realización del Modelo Hidrogeológico Conceptual:

Modelo Geológico: La principal tarea para la construcción de un modelo hidrogeológico, es el reconocimiento de la Geología, para conocer el flujo del agua subterránea en el subsuelo. A partir de la delimitación de la zona de estudio se hizo reconocimiento de la estratigrafía y la geología estructural, obteniendo indicios de características tales como; porosidad y permeabilidad teniendo en cuenta la descripción de las rocas. Hay que tener en cuenta que dentro de la franja de estudio se encuentra la zona urbana del municipio de Chiquinquirá y sus zonas aledañas, viéndose afectadas estas características de manera importante, debido a las construcciones.

Tomando en cuenta la metodología del Estudio Nacional del Agua de 2014, se puede realizar la evaluación Geológica, mediante dos tipos de Métodos, directos e Indirectos, los cuales serían:

“**Métodos directos:** observaciones de afloramientos, levantamiento de columnas estratigráficas, correlaciones estratigráficas, elaboración de secciones geológico-geofísicas, análisis de registros litológicos de perforaciones exploratorias. **Métodos indirectos:** procesamiento de imágenes de satélite, radar, fotografías aéreas e interpretación geofísica de Sondeos Eléctricos Verticales SEVs, registros sísmicos, tomografías, magnetometría y los correspondientes a perfilaje o registro geofísico de pozos” (IDEAM, 2015). En este estudio, esta información será obtenida de fuentes secundarias, debido a su alto costo.

Geomorfología y Geología Estructural: Estos dos conceptos quedan atados para el presente estudio debido a que la Geomorfología de la zona está controlada por el desarrollo de estructuras,

en este caso el sinclinal Aposentos-Chiquinquirá, el cual es el principal rasgo geomorfológico, siendo este mismo un factor importante en la disposición de las zonas de recarga y descargas de las formaciones aflorante con capacidad almacenamiento de agua.

Sinclinal: (Ver FIGURA 1), se muestra la deformación de la corteza terrestre, esta se manifiesta en plegamiento de las rocas formando anticlinales y/o sinclinales. Un sinclinal es la expresión morfológica de eventos estructurales en la cual la disposición de los estratos se muestra como una sinforma, donde los estratos más antiguos envuelven a los más modernos, situándose estos últimos en el núcleo del mismo. Estos tienen la convexidad hacia abajo.

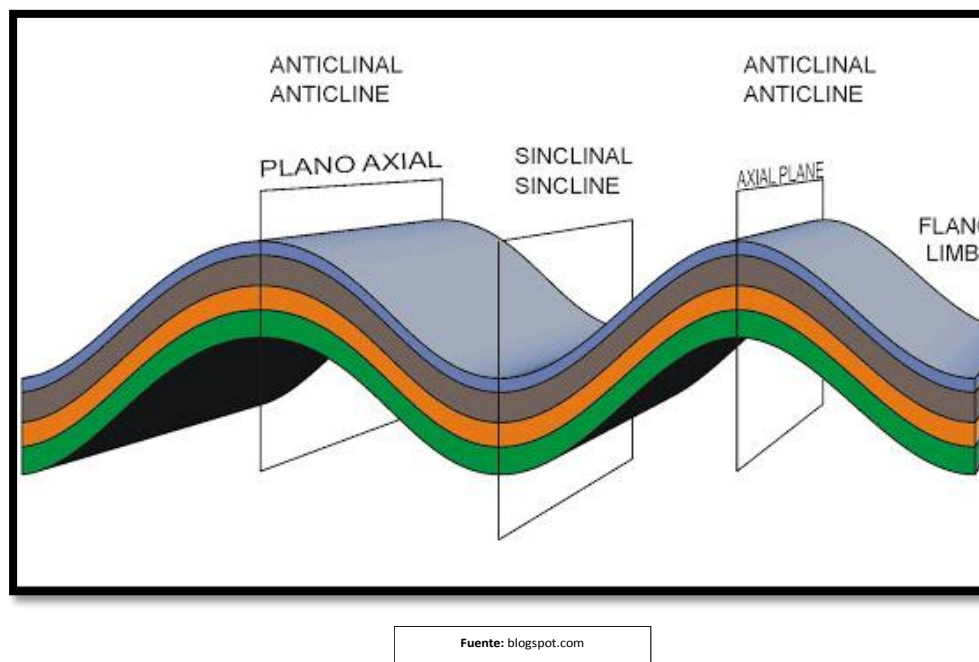


FIGURA 1 Representación gráfica de plegamiento de las rocas

Balance Hídrico Subsuperficial: A partir de un estudio de balance hídrico se puede realizar una evaluación cuantitativa de los recursos hídricos, presentes en un espacio geográfico determinado, y la influencia ejercida por el factor antrópico. (En la FIGURA 2), se muestra el ciclo de agua en

la atmosfera en la superficie de la tierra, el transito subterráneo y el paso por sus diferentes estados. Es de especial importancia este tópico en las áreas cercanas al casco urbano del municipio de Chiquinquirá, obteniendo en algunos momentos factores que alteraran de manera significativa los resultados de los análisis a realizar, en el balance hídrico se obviaron los valores de la superficie de la población.

Evapotranspiración: El método de Thornthwaite para el cálculo de la evapotranspiración fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escurrimiento para diversas cuencas de drenaje. El resultado es básicamente una relación empírica entre la ETP y la temperatura del aire. A pesar de la simplicidad y las limitaciones obvias del método, funciona bien para las regiones húmedas. No es necesariamente el método más exacto ni tampoco el que tiene las bases teóricas más profundas. Por el contrario, probablemente esas características corresponden a aquellas que involucran flujo de vapor y balance de calor.

Entre las diferencias más notorias del método de Thornthwaite se encuentra la suposición de que existe una alta correlación entre la temperatura y algunos de los otros parámetros pertinentes tales como radiación, humedad atmosférica y viento. Mientras que tales limitaciones pueden ser poco importantes bajo ciertas condiciones, a veces pueden resultar relevantes. Thornthwaite y Mather, quienes conocieran que la radiación solar y la turbulencia atmosférica son factores de importancia en la ETR, han establecido que el problema de desarrollar una fórmula para la ETP permanece aún sin resolver.

Los métodos que incluyen flujo de vapor y balance de calor requieren datos meteorológicos que, o no son medidos o son observados en pocos puntos, muy espaciados. Por el contrario, la fórmula empírica de Thornthwaite puede ser usada para cualquier zona en la cual se registran la Temperatura máxima y Temperatura mínima diarias.



Fuente: USGS

FIGURA 2 Ciclo hidrológico.

2.2 ESTADO DEL ARTE

El IDEAM, publica en el año 2015 el documento Estudio Nacional del agua 2014, cuyo objetivo principal es dar a conocer y estudiar la riqueza en agua del país, su uso y las medidas de protección de este elemento valioso profundizando en esto más allá de los intereses sectoriales. En el capítulo tres se aborda el tema de las aguas subterráneas y nos presenta una metodología para el desarrollo de un modelo Hidrogeológico Conceptual.

El proyecto de consultoría (1327 de 2014), establecido entre la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR y el Consorcio Alto Suárez, determina la definición de un modelo hidrogeológico conceptual para la Cuenca del Río Alto Suárez basado en el levantamiento de campo desarrollado en estudios previos, y de exploración geofísica, como geoelectrica, sísmica y magnetotelúrica.

El contrato 1116 de 2013 desarrollado por la CAR y la firma GEOCING SAS cuyo objeto es “Modelar formaciones geológicas prioritarias que constituyen acuíferos y diseñar la red de

monitoreo de niveles piezométricos y calidad de agua subterránea en la cuenca del Río Alto Suárez”, establece la generación de modelos de las diferentes unidades geológicas presentes en el área de estudio y posterior diseño de la red de monitoreo.

La Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA fue elaborada por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) de Chile, publicado en el año 2012, con el fin de establecer una base en cuanto a los contenidos mínimos que deben acompañar una modelación, de tal forma que se entregue la información relevante y suficiente para su evaluación; y así mejorar la calidad de los modelos desarrollados.

El trabajo “Caracterización hidrogeológica y modelación numérica de un sistema con flujo con densidad variable, sistema hidrogeológico de la laguna Fuente de Piedra, Malaga, España” 2009, describe los estudios realizados y los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

El documento publicado por la docente María Victoria Vélez, 1999, Hidráulica de aguas subterráneas presenta una recopilación de material bibliográfico, cursos, dirección de tesis, proyectos de grado y trabajos que la autora ha realizado durante varios años de asesoría en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional sede de Medellín, que se han desarrollado alrededor del país.

3 METODOLOGÍA

3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

“Un modelo Hidrogeológico Conceptual es un esquema lógico, que trata de predecir el comportamiento del flujo del agua, determinar recursos explotables y prever posibles impactos ambientales sobre el sistema de aguas subterráneas. Para su construcción es necesario disponer de información geológica, geomorfológica, hidrológica, química e hidráulica” (Servicio De Evaluación Ambiental, SEA, 2012), cabe anotar que este ejercicio de modelamiento se plantea desde el punto de vista conceptual e implica que gran cantidad de la información a utilizar es secundaria.

1. Recopilación de Información: Se realizó la revisión de estudios anteriores y la consulta en bases de datos de distintos organismos de carácter público y privado, a continuación se mencionan algunas instituciones que sirvieron como fuente de información: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR); Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá – SDA; Empresas Públicas de Chiquinquirá ESP – EMPOCHIQUINQUIRÁ ESP; Servicio Geológico Colombiano (SGC), Secretaria de planeación municipal Chiquinquirá.

2. Análisis de la Información: Se revisó la información, bases de datos, se analizó y se filtró escogiendo la información relevante para la construcción de los diferentes Modelos que sirvieron de base para realizar el Modelo Hidrogeológico conceptual.

Siguiendo los siguientes pasos:

- Revisión bibliográfica.
- Selección del Modelo Hidrológico.
- Selección de datos relevantes para la construcción de los modelos.
- Análisis de los datos resultantes.

- Selección del mejor Modelo Hidrogeológico

3. Presentación del Modelo Hidrogeológico Conceptual: Finalmente se construye un modelo hidrogeológico conceptual en el cual se integra la información geológica, hidrogeológica, hidrológica, e hidráulica que se haya recopilado, mediante un bloque diagrama que explica la información resultante.

4. Presentación de resultados e informe final.

4 MODELO GEOLÓGICO

4.1 ESTRATIGRAFÍA

Se presenta a continuación una descripción litológica de las formaciones aflorantes en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá, en el presente trabajo se toman las denominaciones oficiales más recientes publicadas por el Servicio Geológico Colombiano. Se referenciaron usando las denominaciones utilizadas en la plancha geológica 190 Chiquinquirá por Fuquen y Osorno (2005).

4.1.1 Cretácico

Formación Areniscas de Chiquinquirá (K1K2Chi)

“Ulloa y Rodríguez (1979) propusieron el nombre y rango de formación a esta unidad litoestratigráfica para representar los tres niveles de arenisca cuarzosa, de grano fino, micáceas, separadas por dos niveles de lutitas grises oscuras a negras que afloran en la sección de la carretera Sutamarchán - Chiquinquirá, y que suprayacen a la formación Simití” (Ulloa & Rodríguez, 1994).

Formación Simijaca (K2s)

Montoya & Reyes (2003) en el informe Geología de la Plancha 209 Zipaquirá, mencionan que “Ulloa & Rodríguez (1991), proponen el nombre de Formación Simijaca a una sucesión de lutitas y limolitas grises oscuras con delgadas intercalaciones de areniscas que afloran al sur de la población de Simijaca, está limitada en su base por las Areniscas de Chiquinquirá y suprayace la Formación La Frontera. Constituido principalmente por lutitas grises oscuras negras, con delgadas intercalaciones de limolitas micáceas, ferruginosas y areniscas arcillosas a veces cuarzosas, de grano fino a medio.

Formación La Frontera (K2f)

Montoya & Reyes (2003) en el informe Geología de la Plancha 209 Zipaquirá, reconocieron esta unidad en el sector occidental y oriental de la plancha geológica mencionada. En sectores localizados en Ubaté, Sutatausa, San Cayetano se presenta como un intervalo calcáreo - lodoso en la base, mientras que en el techo es una unidad litológica silícea.

Formación Conejo (K2c)

En la plancha 209, de Acuerdo con Montoya & Reyes (2003) “la Formación Conejo es una secuencia constituida por arcillolitas, calizas, limolitas silíceas y areniscas; se caracteriza por presentar intercalaciones de arcillolitas en bancos gruesos con capas medias a muy gruesas de areniscas que generan una morfología de valles y crestas.

4.1.2 Cuaternario.

Depósito Aluvial Reciente (Q2al)

Son aquellos depósitos y materiales depositados en los valles de los ríos y afluentes que se localizan a lo largo de los drenajes del área. Se caracterizan por presentar material no consolidado, arenoso y limoso con escasas barras de gravas; las areniscas son de varias granulometrías. Son de baja extensión y de poco espesor.

Deposito Lacustre (Q2l)

Estos depósitos se caracterizan por formar superficies planas bajas, en ocasiones sin disección, los cuales se formaron en lo que fue un antiguo lago del cual queda remanentes en las lagunas de

Cucunubá y la Laguna de Fúquene. Hacia los bordes se observó un depósito de un metro constituido por arenas y arcillas y localmente lentes de gravas.

Deposito Coluvial (Q2c).

Son depósitos resultantes de los procesos de denudación de las laderas (movimientos en masa y erosión) cuyos agentes geodinámicas son de orden hidrogravitacional y fluvioglacial. Comprende una gran variedad de depósitos clasificados de acuerdo a su origen y forma. Los más comunes son deslizamientos y flujos de composición heterogénea, tamaño variado y pobremente sorteados.

4.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.

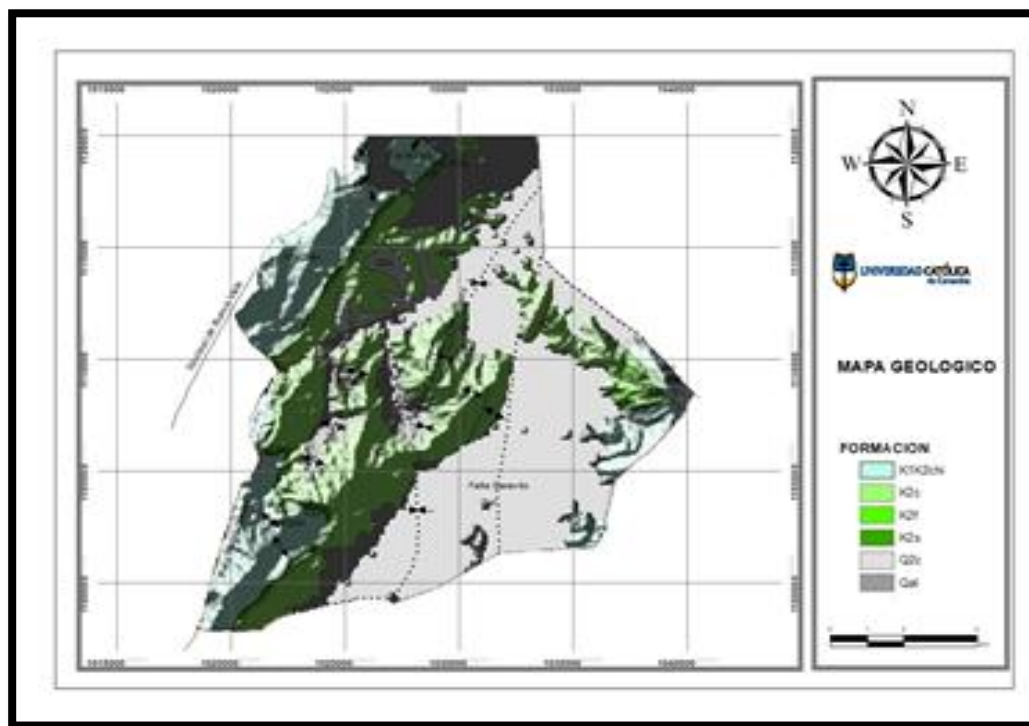
El registro de la acumulación de sedimentos comenzó cuando aún la cordillera Oriental estaba en una etapa Sinrift (Cooper, et al., 1995; Acosta, 2002; Sarmiento, 2002; Branquet, et al. 2002 en Montoya & Reyes, 2003) con fallas normales que controlaban la sedimentación y que posteriormente fueron reactivadas por inversión tectónica, durante la fase de la orogenia andina en el Mioceno Plioceno (Colletta et al., 1990; Branquet, et al., 2002) y por último el levantamiento de la cordillera durante el plioceno (Van der Hammen, 2003). De acuerdo con Montoya & Reyes (2003), la Cordillera Oriental se formó en el Neógeno, como respuesta a los esfuerzos compresivos que involucran la convergencia de las placas de Suramérica, Nazca y Caribe. Esta interacción dio lugar a una deformación intensa y un acortamiento en dirección ENE-WSW, perpendicular a las estructuras regionales. Sarmiento (2002) plantea que hubo una deformación por movimientos transcurrentes dextrales en el flanco sur-oriental de la subcuenca del Cocuy y la subcuenca de Cundinamarca, que involucra el área de este estudio.

La Geología estructural de la Cuenca del Alto Río Suárez está caracterizada por una tectónica compresiva de plegamientos y fallas inversas de manera alternada. Así, se tienen estructuras sinclinales amplias y favorables para la acumulación de aguas subterráneas tales como el Sinclinal de Aposentos-Chiquinquirá, el cual controla la cuenca hidrogeológica de la zona. (CAR & GEOSING S.A.S, 2014).

En sus flancos hacia las partes altas se presentan zonas de recarga dominadas por la sinforma, en su núcleo existe también zona de recarga debido a la litología de sedimentos poco consolidados, y heterogéneos de los depósitos fluvio-lacustres, además de encontrarse en zonas de planicie, que incrementan su potencial de infiltración.

Las zonas de descarga subterránea, se asumen que por la geología van en dirección de los flancos hacia el núcleo, y en superficie se presentan como manantiales en los contactos litológicos entre la Formación Conejo y los sedimentos Cuaternarios, siendo concordantes con los cambios de pendientes.

En la **FIGURA 3** se presenta el mapa geológico donde se grafican las formaciones geológicas descritas anteriormente y las estructuras geológicas más importantes.

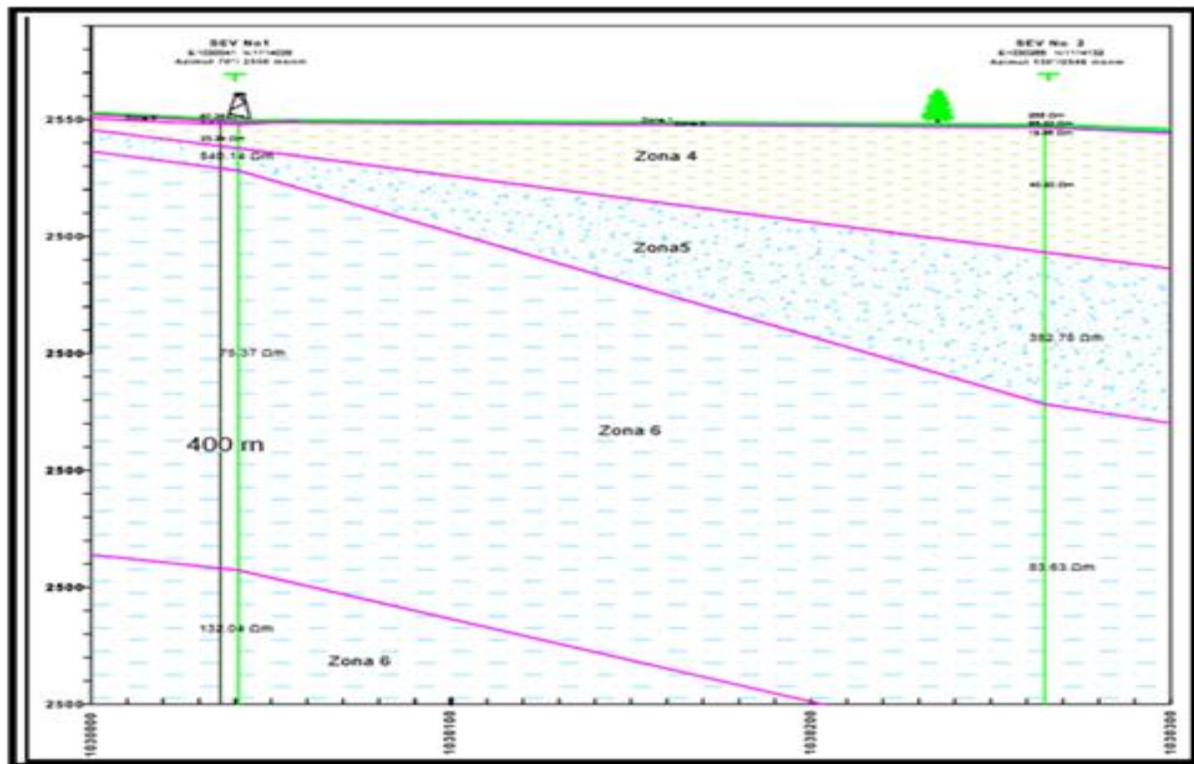


Fuente: Los Autores

FIGURA 3. Mapa Geológico.

4.3 GEOFISICA

Se tomó información de los sondeos eléctricos verticales realizados por la empresa Hidrogeoservicios S.A.S, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá, donde se perforó un pozo profundo en el sector norte, a una profundidad de 400 metros, en este se registró un espesor del depósito cuaternario en la parte central de 120 metros, este depósito va disminuyendo su espesor hacia los costados hasta desaparecer. El nivel freático se detectó a 5 metros de profundidad. La FIGURA 4 muestra un perfil geoelectrico de los dos sondeos realizados.



Fuente: Hidrogeoservicios S.A.S.

FIGURA 4 Perfil geofísico.

4.4 HIDROGEOLOGIA

A continuación se hace una breve descripción de las diferentes unidades geológicas que afloran en la zona de estudio

FORMACIÓN CHIQUINQUIRA: Compuesta por tres niveles de arenisca cuarzosa, de grano fino, micáceas, separadas por dos niveles de lutitas grises oscuras a negras que afloran en la sección de la carretera Sutamarchán - Chiquinquirá, y que suprayacen a la formación Simití”. Forma un acuífero libre en el área donde aflora, y se convierte en acuífero confinado al centro del eje del sinclinal de Chiquinquirá.

FORMACIÓN SIMIJACA: Sucesión de lutitas y limolitas grises oscuras con delgadas intercalaciones de areniscas que afloran al sur de la población de Simijaca, está limitada en su base por las Areniscas de Chiquinquirá y en el tope por la Formación Frontera. Hidrogeológicamente se clasifica como acuitardo; pueden constituir acuíferos locales en sus niveles arenosos con porosidad secundaria, pero no tiene capacidad de transmitir el agua.

FORMACIÓN FRONTERA: Miembro lidítico calcáreo, compuesto hacia su base por limolitas silíceas, grises oscuras a negras, estratificadas, con nódulos arcillosos y piritosos, e intercalaciones delgadas de shales negros; su parte media está constituida por lutitas grises oscuras a negras, con nódulos arcillosos. Hidrogeológicamente se clasifica como acuitardo; pueden constituir acuíferos locales en sus niveles fracturados, en zona de falla, presenta porosidad secundaria, pero no tiene capacidad de transmitir el agua.

FORMACIÓN CONEJO: Secuencia constituida por arcillolitas, calizas, limolitas silíceas y areniscas; se caracteriza por presentar intercalaciones de arcillolitas en bancos gruesos con capas medias a muy gruesas de areniscas que generan una morfología de valles y crestas. Hidrogeológicamente se clasifica como acuitardo; pueden constituir acuíferos locales en sus niveles arenosos, esta formación también posee porosidad secundaria por fracturamiento y por disolución de rocas calcáreas. En esta formación se han perforado varios pozos profundos en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá, produciendo 7 lps aproximadamente.

CUATERNARIO: Depósitos no consolidados con materiales de variados tamaños con forma angulares y subangulares, de regular selección. Forman acuíferos; libres, locales, de moderada a buena productividad, fuente de recarga: precipitación, aguas superficiales y subterráneas.

4.5 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

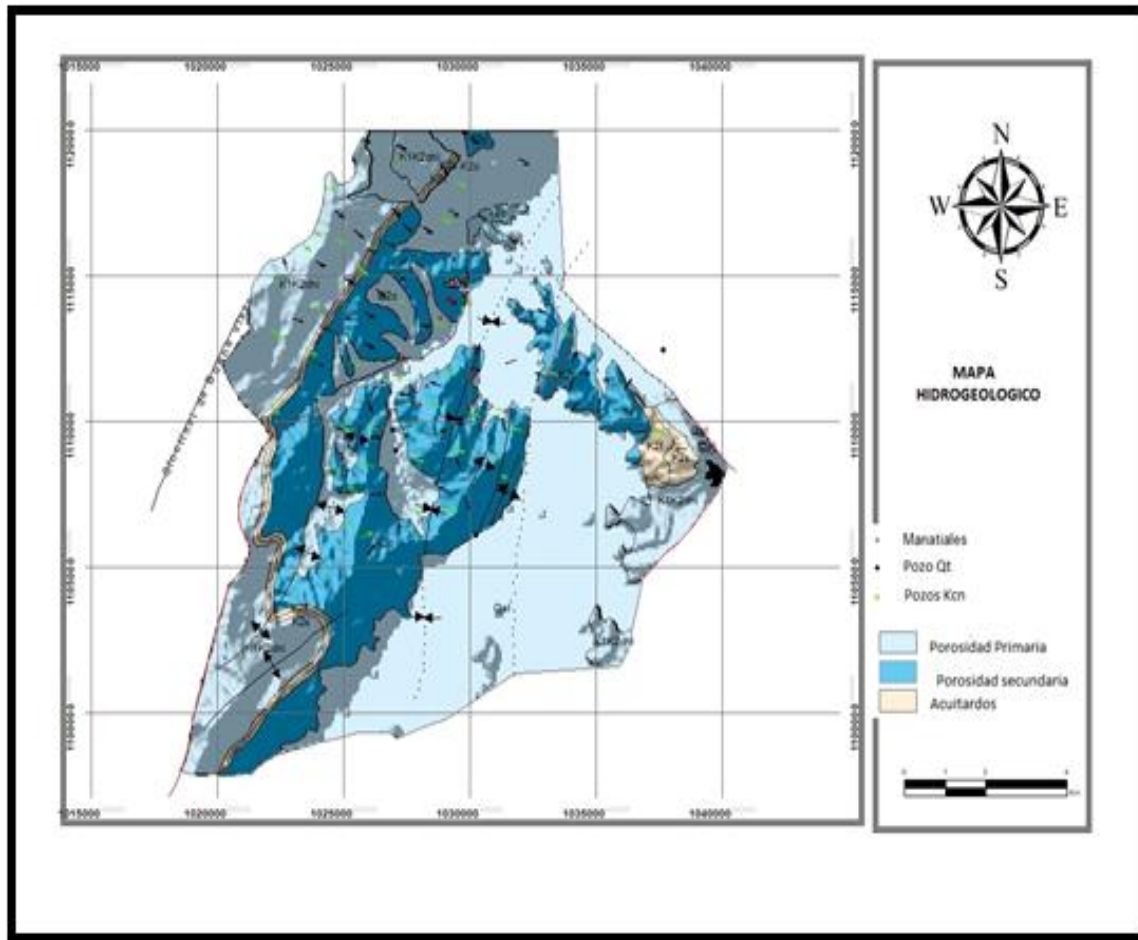
Se recopilaron datos de los puntos de agua reportado en los estudios realizados por (CAR & GEOSING S.A.S, 2014), (CAR & CONSORCIO ALTO SUAREZ, 2015), y (GOBERNACION DE BOYACA & UPTC 2016).

Se graficaron los puntos de manantiales recopilados en el mapa hidrogeológico, los cuales muestran una distribución a lo largo del contacto entre la Formación Conejo y el depósito Cuaternario, por consiguiente se pueden clasificar como manantiales de Contacto.

Por escases de información no fue posible graficar las líneas equipotenciales para identificar dirección de flujos subterráneos, se infiere una dirección la cual es paralela al buzamiento de los estratos. La dirección del flujo presente en el acuífero libre del depósito cuaternario es hacia el Nor-Este, siguiendo la dirección del río. A continuación se presenta el mapa hidrogeológico con las edades hidrogeológicas según la porosidad.

En el mapa hidrogeológico, (Ver **FIGURA 5**), se pueden observar las diferentes unidades hidrogeológicas, en azul muy claro se representan las unidades con porosidad primaria, conformadas por las Formaciones Areniscas de Chiquinquirá y los depósitos Cuaternarios, con azul oscuro las que poseen porosidad secundaria, en este caso solo la Formación Conejo tiene porosidad secundaria debido a fracturamiento y disolución de carbonatos en las capas arenosas generando porosidad efectiva y permeabilidad o transmisividad del agua muy baja, comportándose estas areniscas como acuíferos de muy baja transmisividad. En café muy claro se presentan las Formaciones Simijaca y Frontera las cuales se clasifican como acuitardos, debido a su contenido arcilloso, estas pueden retener agua, pero no transmitirla.

También se presentan las direcciones de flujo de agua superficial que van desde las zonas de alta pendiente en la parte oeste hacia el centro del núcleo del anticlinal, en el núcleo toman la misma dirección de las aguas subterráneas en formaciones con porosidad efectiva y transmisividad como la Formación Areniscas de Chiquinquirá y la Formación Conejo.



Fuente: Los Autores

FIGURA 5. Mapa Hidrogeológico.

5 BALANCE HIDRICO SUBSUPERFICIAL

A partir de un estudio de balance hídrico se puede realizar una evaluación cuantitativa del agua presente en un espacio geográfico determinado. La influencia ejercida por el factor antrópico es de especial importancia en la zona de estudio que es muy cercana al área urbana del municipio de Chiquinquirá, obteniendo en algunos momentos factores que alteraran de manera significativa los resultados de los análisis a realizar, para el balance hídrico se obvió el espacio donde se encuentra situada la población.

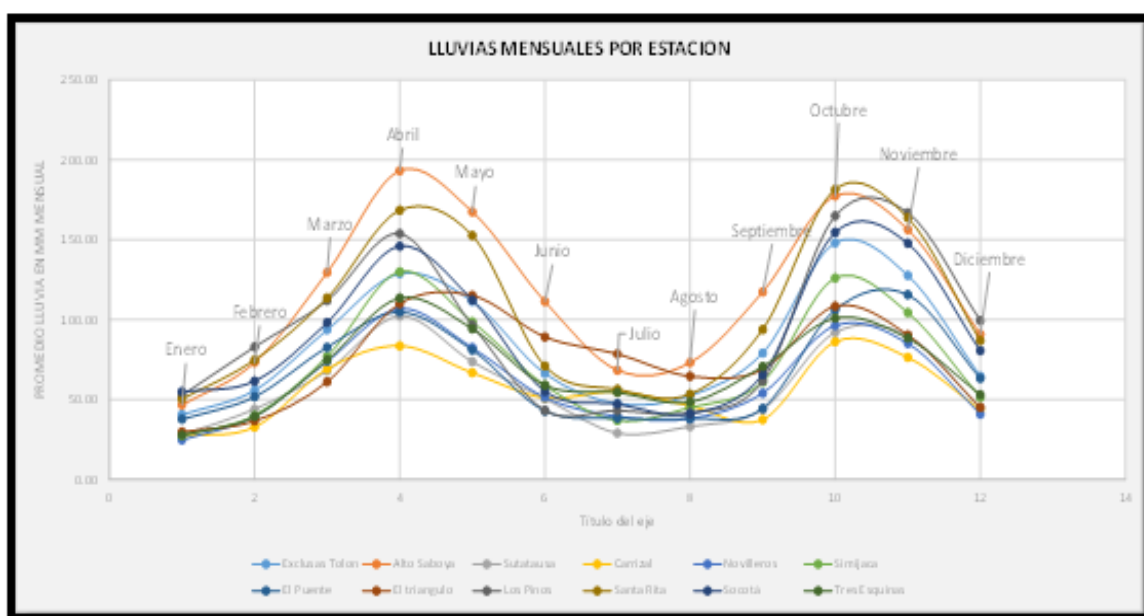
“El conocimiento del balance hídrico de lagos, cuencas superficiales y cuencas subterráneas, es de vital importancia para el entendimiento del ciclo hidrológico, en el mismo sentido se pueden cuantificar los recursos de agua en un sistema y obtener un uso más racional y realizar una distribución más eficaz del mismo, en los asentamientos humanos. La necesidad de conocer el potencial de aguas subterráneas para ser explotadas mediante pozos, conlleva a estimar la recarga de los acuíferos, para evaluar la infiltración de la lluvia que penetra al suelo en una zona, se determinan: la precipitación mensual de la zona, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y su pendiente, a partir de estos valores se evalúa la infiltración” (Schosinsky, 2007).

A partir de la metodología propuesta por Schosinsky se calculó y analizó:

5.1 PLUVIOSIDAD

Los datos de pluviosidad solicitados al IDEAM de promedios mensuales anuales de las lluvias son de las siguientes estaciones: Exclusas Tolón, Alto de Saboya, Sutatausa, Carrizal, Novilleros, Simijaca, El Puente, El Triangulo, Los Pinos, Santa Rita, Socotá, Tres Esquinas, las series usadas abarcaron 30 años, no todas las estaciones presentaban la disponibilidad de datos de la series solicitadas.

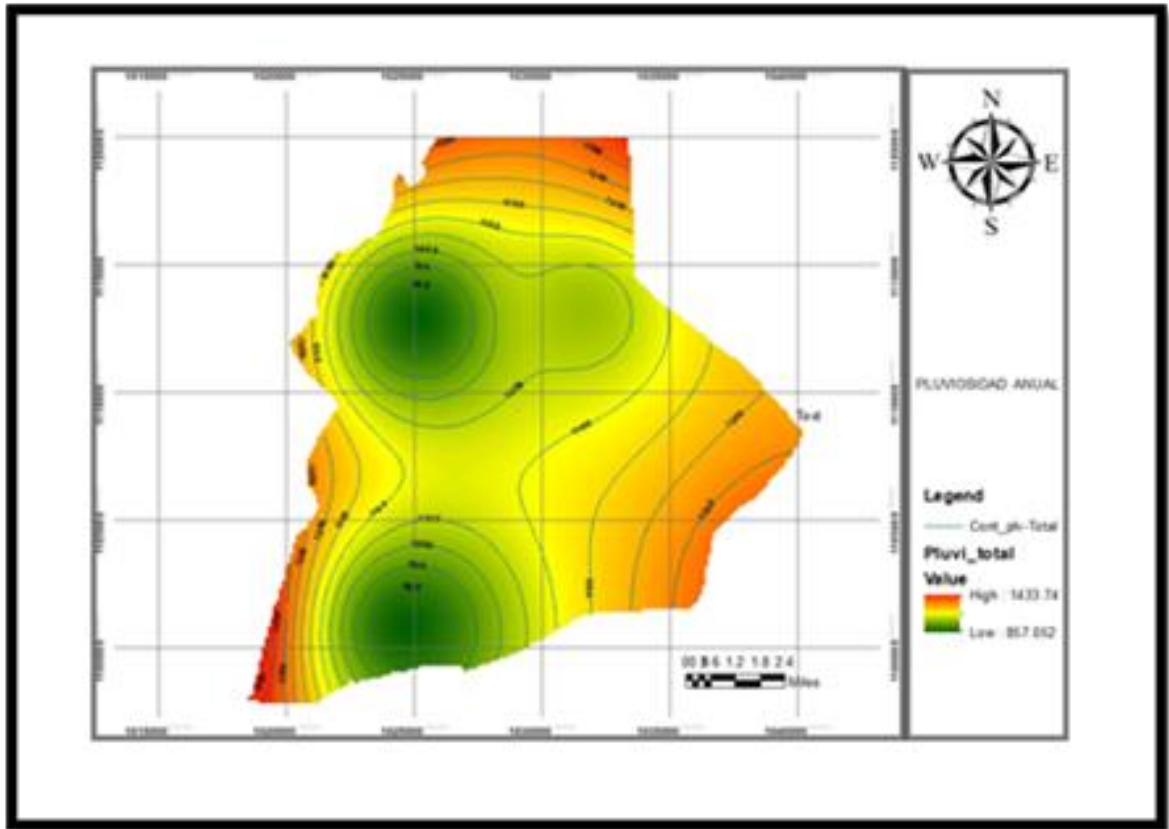
Observando la gráfica de las pluviosidades por estaciones, (ver FIGURA 6) se observa un régimen bimodal, mostrando incremento de las lluvias en los intervalos (marzo-mayo), en el primer semestre del año y (septiembre-noviembre) durante el segundo semestre del año, según esto podemos inferir mayor recarga en los meses en los cuales el suelo puede llegar a punto de saturación, debido a la mayor cantidad de agua que recibe, por lo tanto aumenta su potencial de infiltración durante estos meses más lluviosos.



Fuente: Los Autores

FIGURA 6. Pluviosidades Mensuales por Estaciones

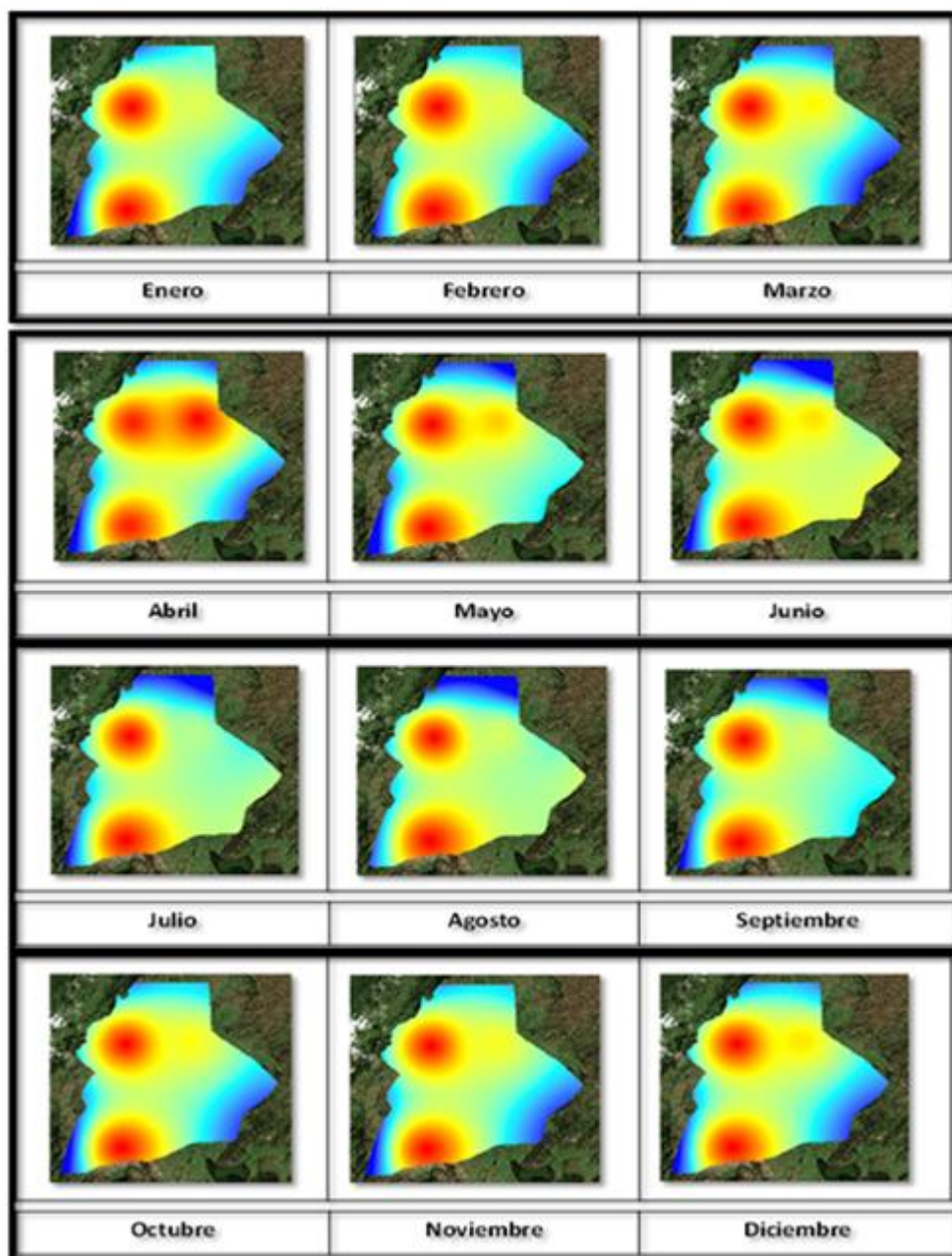
A continuación se presenta el mapa de precipitaciones totales anuales, (ver FIGURA 7), las tonalidades verdes muestran baja pluviosidad donde se encuentra el centro urbano del municipio de Chiquinquirá con valores aproximados de 1050 mm/año, se concluye que la zona con mayor pluviosidad es hacia el occidente del municipio, siendo concordante con las zonas de alta montaña, donde se alcanzan pluviosidades de 1433 mm/año.



Fuente: Los Autores

FIGURA 7 Pluviosidad Anual

Para la obtención del mapa de pluviosidad anual se realizó el análisis de las precipitaciones o isoyetas mensuales a partir de los datos mensuales multianuales, (ver FIGURA 8), para luego sumar los mapas generados mes a mes, viendo que las tonalidades azules aumentan en los meses de marzo, abril, octubre y noviembre, las tonalidades rojizas expresan las zonas con menores valores de pluviosidad mensual, siendo junio, julio y agosto los meses que presentan menor distribución de pluviosidad al año.



Fuente: Los Autores

FIGURA 8. Mosaico Pluviosidad Mensual

5.2 LA FRACCIÓN DE LLUVIA INTERCEPTADA POR EL FOLLAJE

Para hallar la interceptación de lluvias por follaje se considera que es el 12% de la precipitación mensual, sin embargo se considera que para bosques muy densos la interceptación es del 20%. Por lo tanto se realizó el mapa de interceptación por follaje, a partir del mapa de cobertura vegetal obtenido asignándole valores de $C_{fo} = 0.2$ a los bosques densos y de $C_{fo} = 0.12$ al follaje.

5.2.1 RETENCION POR FOLLAJE

Para el cálculo de la retención mensual de la lluvia por follaje se usó:

Si P es menor o igual a 5 mm/mes, $Ret = P$.

Si el producto (P) multiplicado por (C_{fo}) es mayor o igual de 5 mm/mes $Ret = (P) (C_{fo})$.

Si (P) es mayor de 5 mm/mes y el producto (P) (C_{fo}) menor de 5, $Ret = 5$.

Donde:

P = Precipitación mensual del mes (mm/mes).

Ret = Retención de lluvia en el follaje.

Cfo = Coeficiente de retención en el follaje, $C_{fo} = 0.2$ a los bosques densos y $C_{fo} = 0.12$ para el follaje.

5.3 INFILTRACIÓN.

Uno de los factores más influyentes en la infiltración de la lluvia es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (K_{fc}). Según la ecuación de (Schosinsky y Losilla, 2000) así:

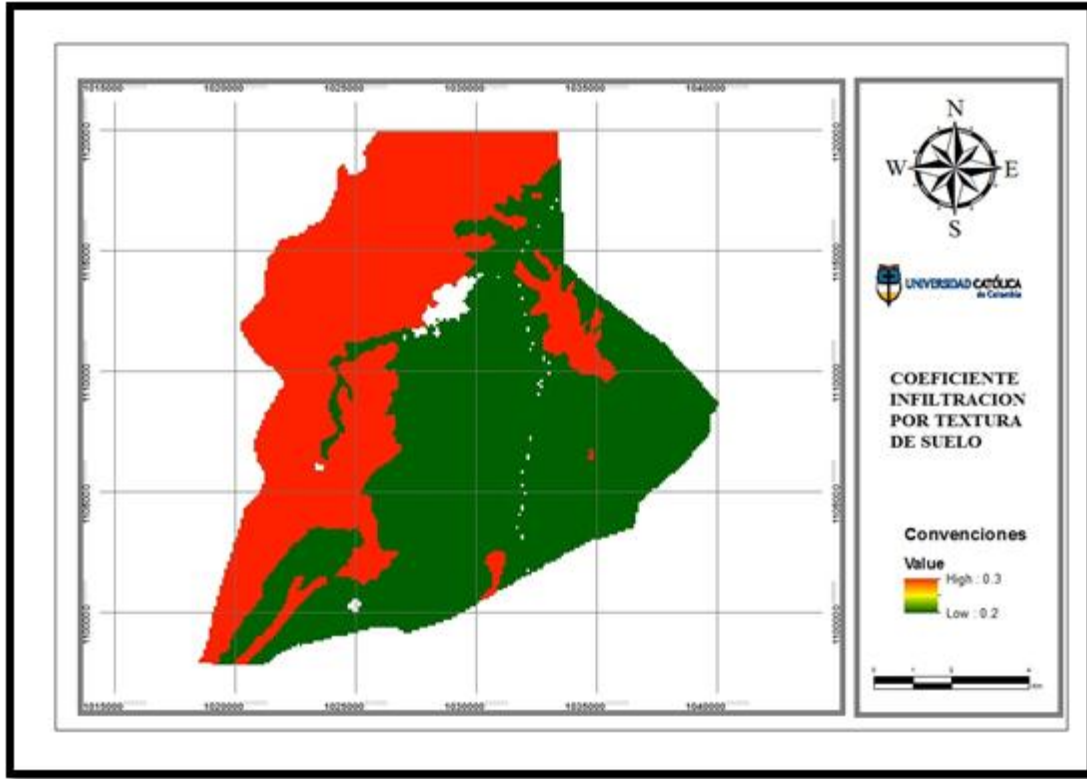
$$K_{fc} = 0.267 \ln (f_c) - 0.000154 f_c - 0.723.$$

Donde:

Kfc (adimensional) = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo).

Fc (mm/día) = Infiltración básica del suelo.

Para aplicar esta ecuación, el rango de f_c ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día.
 Para estos valores de f_c menores de 16 mm/día, $K_{fc} = 0.0148f_c/16$.
 Para valores de f_c mayor a 1568 mm/día, $K_{fc} = 1$.



Fuente: Los Autores

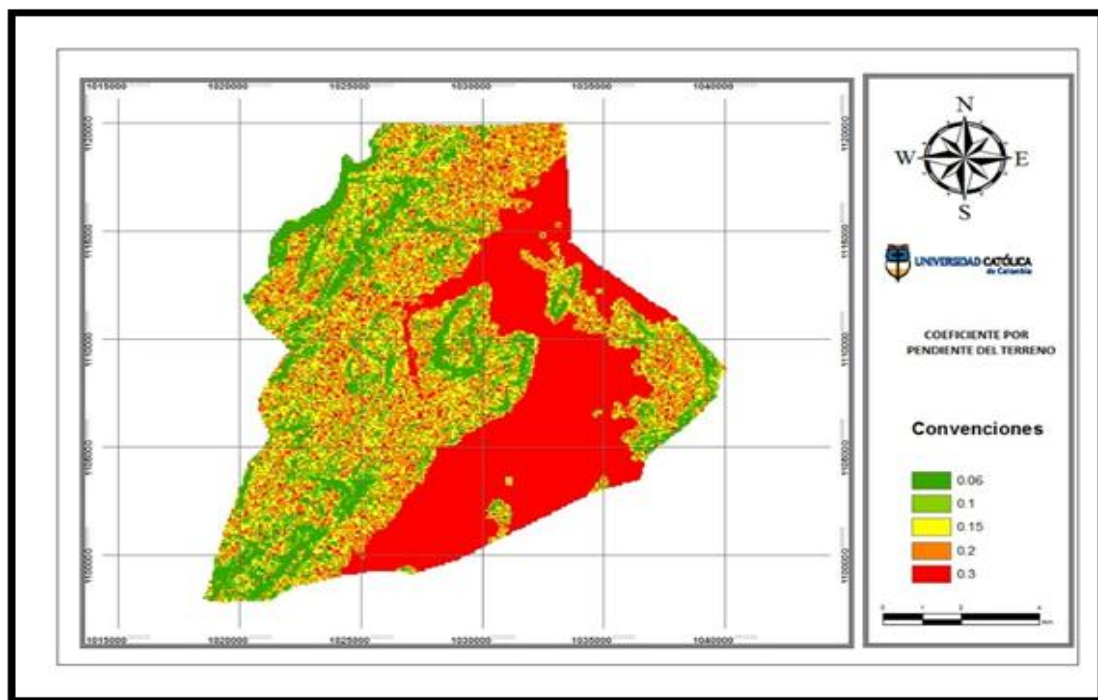
FIGURA 9. Mapa Coeficiente de infiltración por Textura del Suelo.

En el mapa de Coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}), (ver

FIGURA 9), se plasmó la capacidad de infiltración que posee el suelo debido a su textura, la cual va de la mano con su potencial de infiltración, siendo los suelos arenosos los que muestran un mayor coeficiente de infiltración, los suelos francos un coeficiente intermedio y los suelos arcillosos un coeficiente de infiltración bajo, las zonas verdes correspondientes al depósito cuaternario, muestran un tipo de suelo mayormente arcilloso en su composición. El mapa se realizó tomando como base el mapa de suelos del IGAC año 2014, asignándosele un valor de K_{fc} para textura de suelo según la tabla de Losilla, 2014.

5.4 FRACCIÓN QUE INFILTRA POR EFECTO DE PENDIENTE.

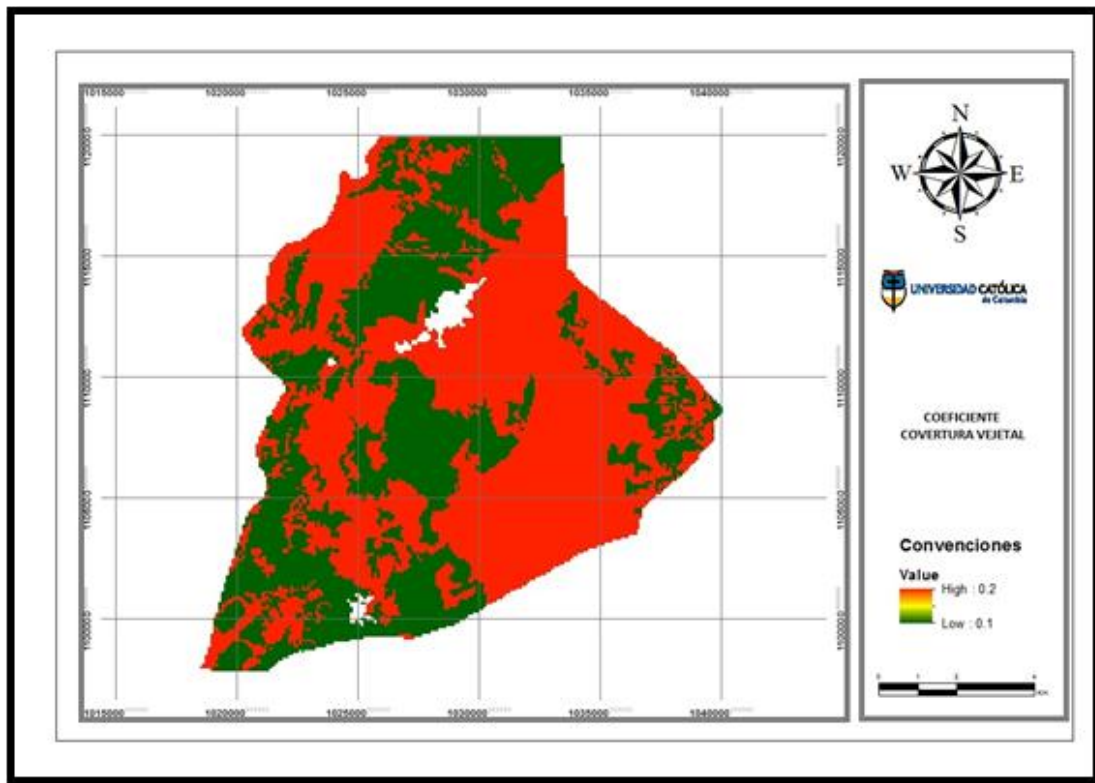
Fracción que infiltra por efecto de pendiente (K_p) (adimensional), se realizó a partir del modelo digital de elevaciones obteniendo un mapa de pendientes, el cual se reclasificó según el marco de referencia de pendientes usado por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), asignándole coeficientes de pendientes según su valor en porcentaje. A partir de la asignación del K_p se obtuvo el mapa de coeficiente o fracción que infiltra a partir de la pendiente del terreno, (ver FIGURA 11), teniendo en cuenta que las zonas de mayor pendiente se les asignó un coeficiente bajo y las zonas de menor pendiente se les asignó un coeficiente alto, queriendo mostrar que las zonas con mayor potencial de infiltración por efecto de pendientes son las zonas de menor pendiente, al contrario las zonas de mayor pendiente tienen mayor escorrentía. En este caso las zonas de menor pendiente concuerdan con los depósitos cuaternarios, que se visibilizan en color rojo, en el mapa.



Fuente: Los Autores

FIGURA 10 Mapa Coeficiente de Infiltración por Efecto de Pendiente

5.5 FRACCIÓN QUE INFILTRA POR COBERTURA VEGETAL.



Fuente: Los Autores

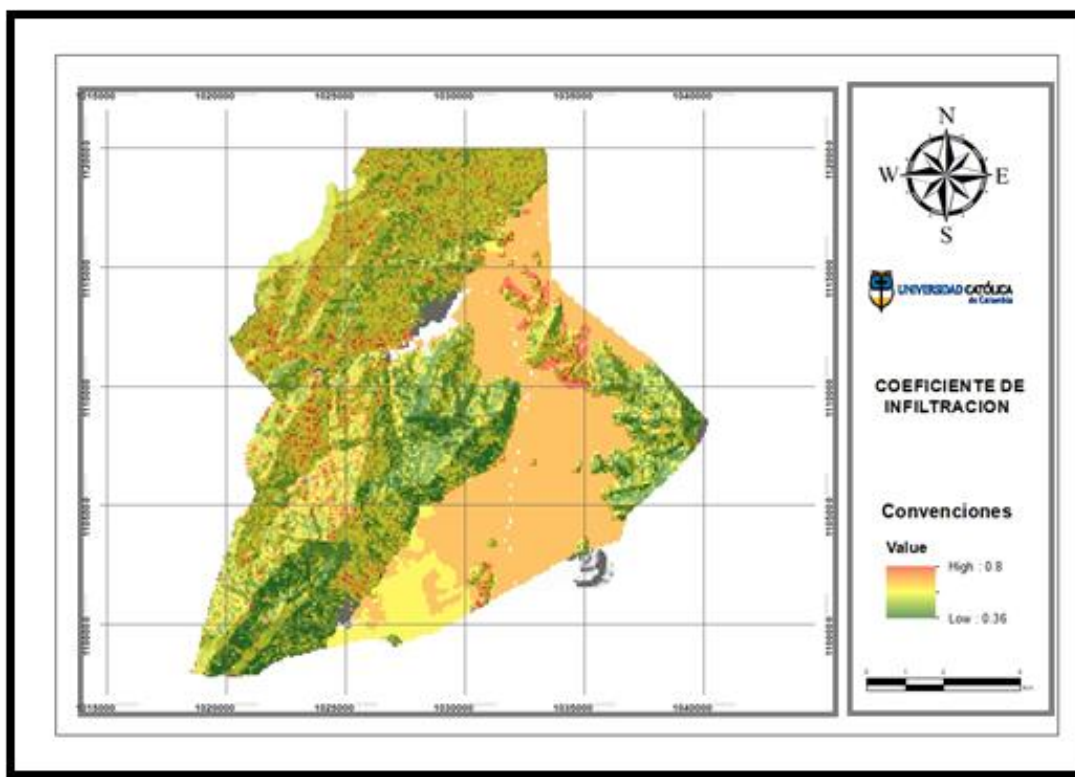
FIGURA 11. Mapa Coeficiente por Cobertura vegetal.

Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal K_v (adimensional) (ver FIGURA 11) se realizó a partir del mapa de cobertura vegetal obtenido del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) se procedió a la asignación de los coeficientes de infiltración por cada uno de los tipos de cobertura vegetal obteniendo el mapa de K_v . Mostrado zonas que por su cobertura vegetal pueden retener en mayor o menor proporción agua por efecto de su follaje, teniendo mayor potencialidad para la infiltración las zonas de bosques, y mostrando menor potencialidad para la infiltración las zonas de cultivos, el color rojo muestra mayor potencial de infiltración por cobertura vegetal, que el color verde.

5.6 COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN

Tomando en cuenta la asignación y georreferenciación de los coeficientes anteriormente descritos se obtuvo el mapa de coeficiente de infiltración sumando los mapas raster de cada uno de los coeficientes bajo la siguiente ecuación.

$$K_p + K_v + K_{fc} = C_i \text{ (coeficiente de infiltración, adimensional).}$$



Fuente: Los Autores

FIGURA 12. Mapa Coeficiente de Infiltración.

Ci el coeficiente de infiltración factor por el cual se multiplica la precipitación para obtener un potencial de agua que infiltrará al suelo. Tomando en cuenta que para valores de C1 mayores a 1, el coeficiente se tomará como 1, ósea el máximo valor a obtener del coeficiente de infiltración es 1 siendo 100% el potencial de precipitación a infiltrar.

El coeficiente de infiltración proporciona la capacidad que tiene una zona de infiltrar agua hacia el subsuelo, debido a ciertas características como los son; la pendiente, la textura del suelo y la cobertura vegetal, el mapa del coeficiente de infiltración de la zona, (ver FIGURA 12), nos muestra que en las franjas con menor pendiente que coinciden con los cultivos muestran una alta capacidad de infiltración, este potencial corresponde a la superficie donde se encuentran los depósitos fluvio-lacustres recientes del cuaternario, como resultado tienen una mayor capacidad de captación de aguas subterráneas para regadíos, además se observa que en sitios de alta pendiente la capacidad de infiltración disminuye en gran medida, debido a la posibilidad de generar más escorrentía por pendientes, estas partes con alta pendiente pueden aumentar su capacidad de captar agua mediante el efecto de la densidad del bosque, aumentando un poco la posibilidad de infiltración al subsuelo.

5.7 INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL

El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente está dado por la siguiente ecuación. Hay que tener en cuenta que el valor máximo para el potencial de infiltración debe ser 1, para valores mayores a 1 serán tomados como 1.

$$P_i = (C_i) (P - Ret).$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

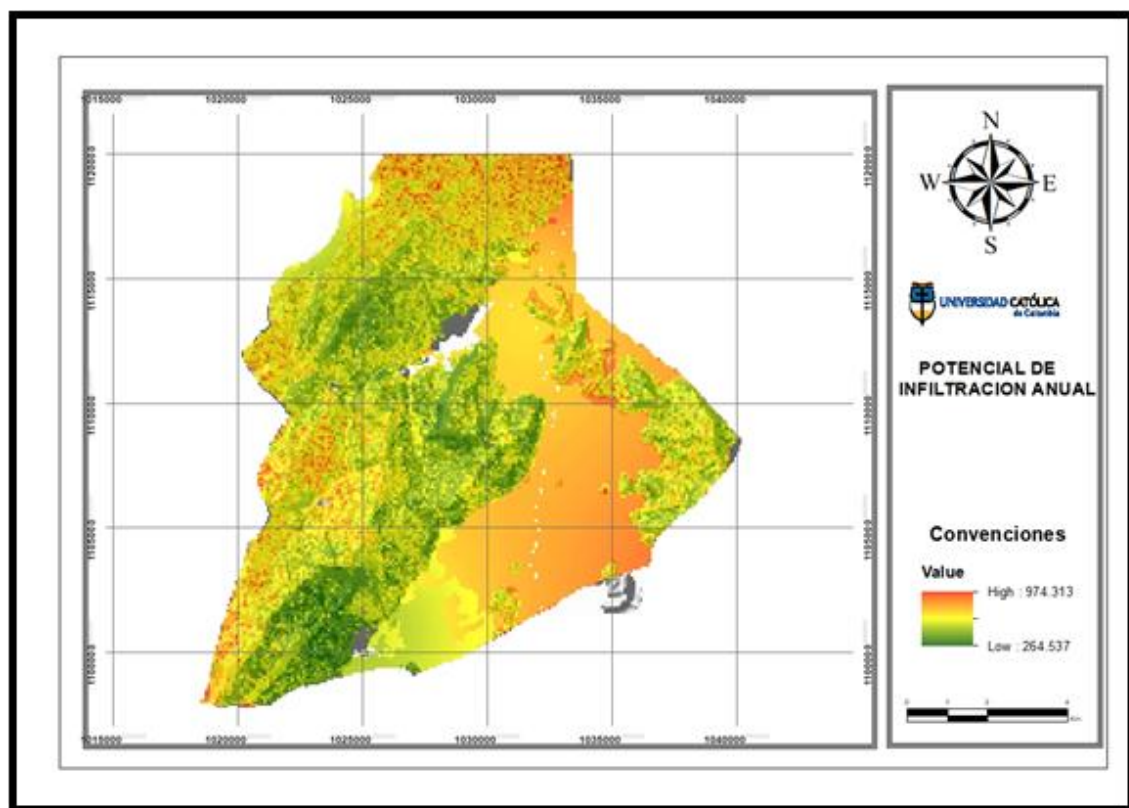
C_i = Coeficiente de infiltración (adimensional).

P = Precipitación mensual del mes (mm/mes).

Ret = Retención de lluvia en el follaje.

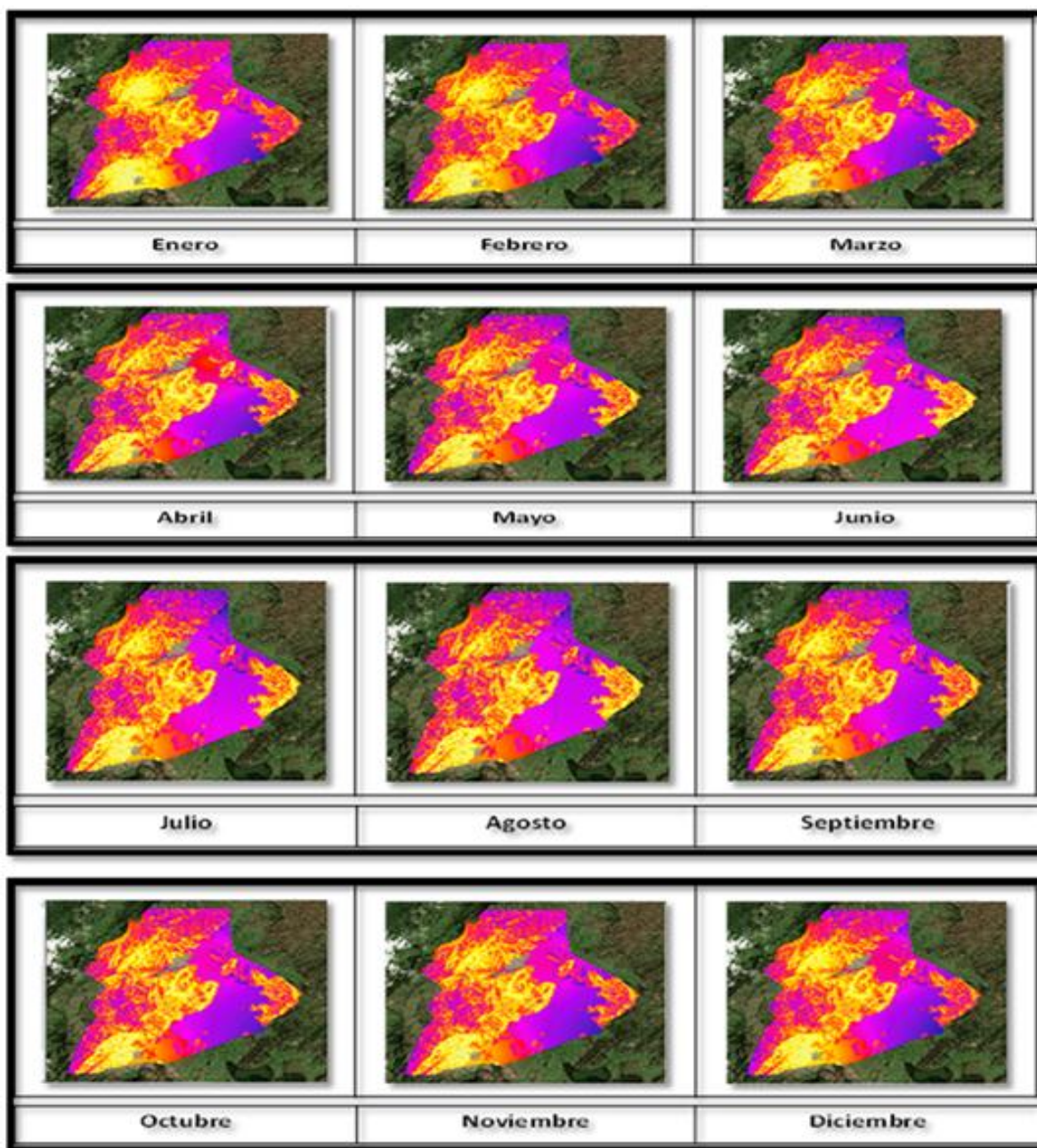
Teniendo en cuenta la ecuación anterior se combinaron los raster mediante álgebra de mapas para obtener la lluvia que infiltra mensualmente.

En el mapa de infiltración (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se observa que la zona en la cual puede existir mayor infiltración de pluviosidad al año es la zona que se encuentra en el cuaternario, parte de esta infiltración, será absorbida por las raíces de las plantas, otra por el suelo para llegar a su capacidad de campo o incluso hasta su punto de saturación, otra parte volverá a la atmósfera debido a la evapotranspiración y la última sobrante, luego de estos procesos finalmente procederá a infiltrarse al subsuelo, para alojarse como agua subterránea. Este mapa es el resultado de la suma de todas las precipitaciones que infiltran mes a mes.



Fuente: Los Autores

FIGURA 13 Mapa Potencial de Infiltración.



Fuente: Los Autores

FIGURA 14. Mosaico Infiltración Mensual.

En la (FIGURA 14) se puede ver el mosaico de mapas de potencial de infiltración por mes, donde podemos observar que la zona de mayor potencial de infiltración luego de aplicar la ecuación de potencial de infiltración recae a los depósitos del cuaternario, estos se presentan con tonalidades azulosas y violáceas en los mapas, siendo los de menor potencial las tonalidades de color amarillo, la cantidad de lluvia que infiltra será directamente proporcional a la pluviosidad promedio de cada mes.

5.8 ESCORRENTIA SUPERFICIAL

La Escorrentía es la parte de la Precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes, de una cuenca. Existen distintos tipos de escorrentías dependiendo de su procedencia: a) Escorrentía Superficial o directa, b) Escorrentía Hipodérmica o Subsuperficial y c) Escorrentía Subterránea.

La Escorrentía Superficial o Directa es la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad. Corresponde a la precipitación que no queda tampoco detenida en las depresiones del suelo, y que escapa a los fenómenos de evapotranspiración. El proceso que describe el agua cuando se inicia un aguacero depende de las características del terreno: la primera lluvia caída se invierte en llenar la capacidad de retención de la parte aérea de las plantas y en saturar el suelo. Cuando la capacidad de infiltración es inferior a la intensidad de la lluvia, el agua comenzará a moverse por la superficie del terreno. Se forma, entonces, una capa delgada de agua. Ésta se mueve por la acción de la gravedad según la pendiente del terreno y es frenada por las irregularidades del suelo y por la presencia de vegetación hasta incorporarse a la red de drenaje, donde se junta con los otros componentes que constituyen la escorrentía total.

La escorrentía para este trabajo está dada por la siguiente ecuación.

$$\text{ESC} = \text{P} - \text{Ret} - \text{Pi}.$$

Donde:

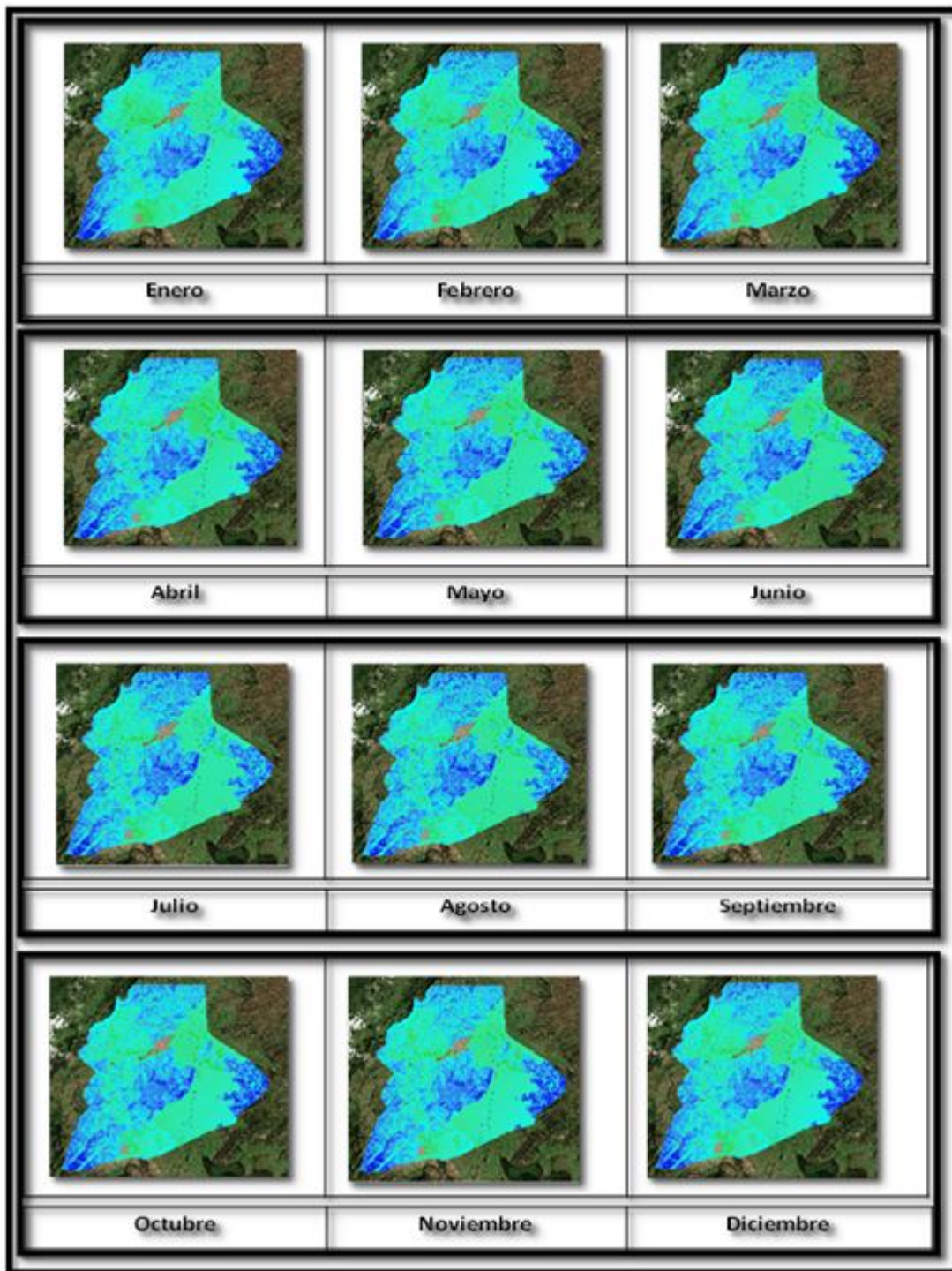
Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

P = Precipitación mensual (mm/mes).

Ret = Retención de lluvia en el follaje.

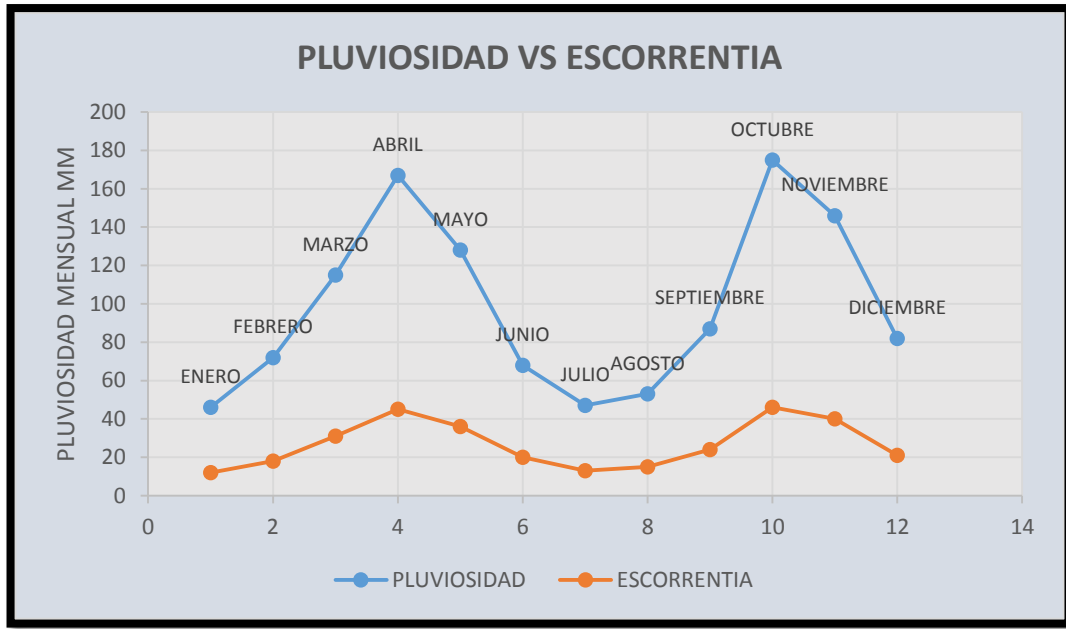
ESC = Escorrentía superficial en mm/mes.

FIGURA 15, Se pueden observar las escorrentías mensuales, mostrando escorrentías altas en las zonas azules y bajas en las zonas de tonalidades verdosas, la escorrentía es directamente proporcional a la pendiente, hay que tener en cuenta que el follaje de un sitio cualquiera ayuda a una mayor retención del agua, asumiendo una menor ponderación para la obtención de la escorrentía. Podemos deducir igual que a mayor pluviosidad mayor escorrentía, entonces los meses de mayor pluviosidad proporcionarían valores más altos de escorrentía superficial.



Fuente: Los Autores

FIGURA 15. Mosaico Escorrentía Promedio Mensual.

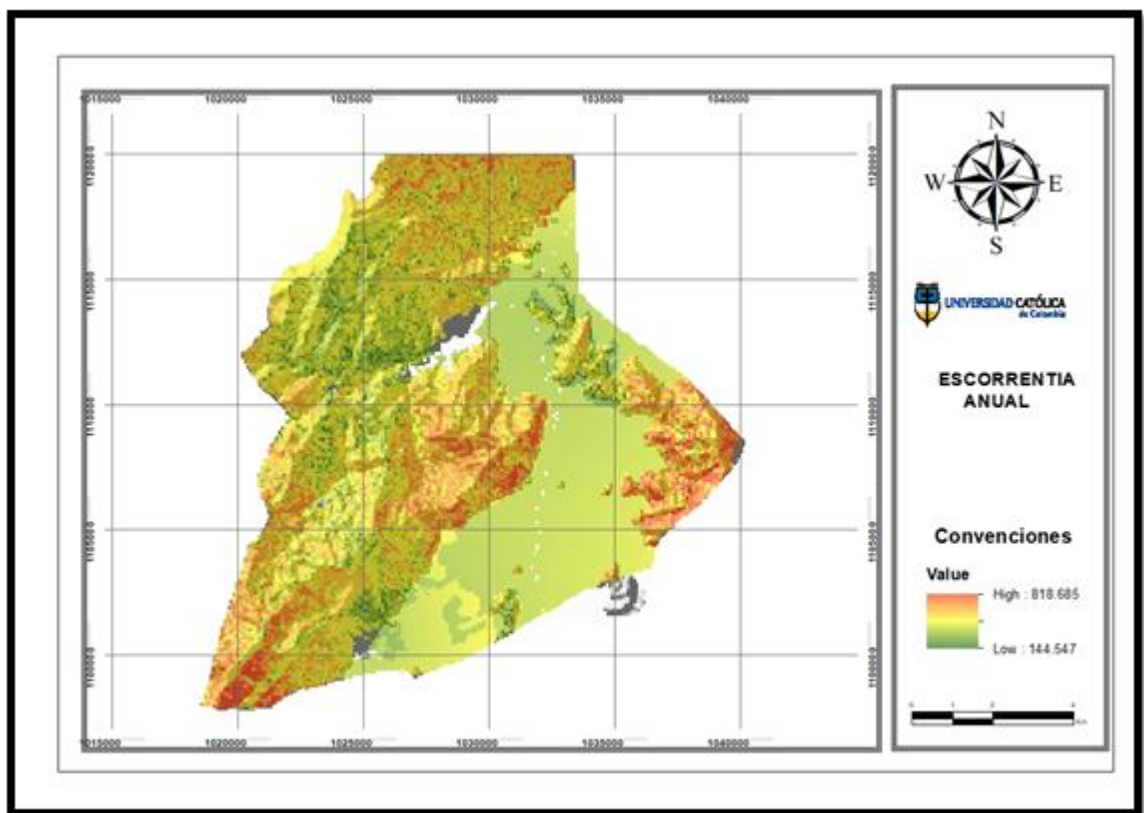


Fuente: Los Autores

FIGURA 16 Escorrentía Vs Pluviosidad.

En la FIGURA 16 se observa claramente que la escorrentía es directamente proporcional a la pluviosidad, durante los meses de abril y octubre, que son los meses más lluviosos se presenta mayor escorrentía superficial, con una escorrentía máxima de hasta 818 mm/año en algunos sectores, en los meses más lluviosos hasta 50 mm/mes, siendo casi una tercera parte del total de la pluviosidad mensual. Enero, Junio, Julio y Agosto, son los meses de menor pluviosidad, por todo lo dicho son los meses con menor escorrentía, la poca pluviosidad de estos meses será absorbida por el suelo en gran parte y llevada a evapotranspiración, no existiendo recarga hacia el subsuelo durante estos periodos.

El mapa de escorrentía, FIGURA 17, exhibe altas escorrentías en zonas de alta pendiente y bajas escorrentías en zonas de poca pendiente, los sitios de baja pendiente concuerdan con los sedimentos cuaternarios y las partes de alta pendiente con las formaciones cretácicas, que tienen mayor competencia. Las tonalidades verdosas muestran zonas de baja escorrentía (mayor potencial de infiltración) y las amarillosas y rojizas, zonas de alta escorrentía (menor potencial de infiltración). En ciertas partes la retención por follaje genera un efecto de compensación en la escorrentía, por lo tanto lugares con altas pendientes presentan una disminución en su escorrentía.



Fuente: Los Autores

FIGURA 17. Escorrentía Anual.

5.9 EVAPOTRANSPIRACION

La fórmula de Thornthwaite es la siguiente:

$$ETP = 16 (10T/I)^a$$

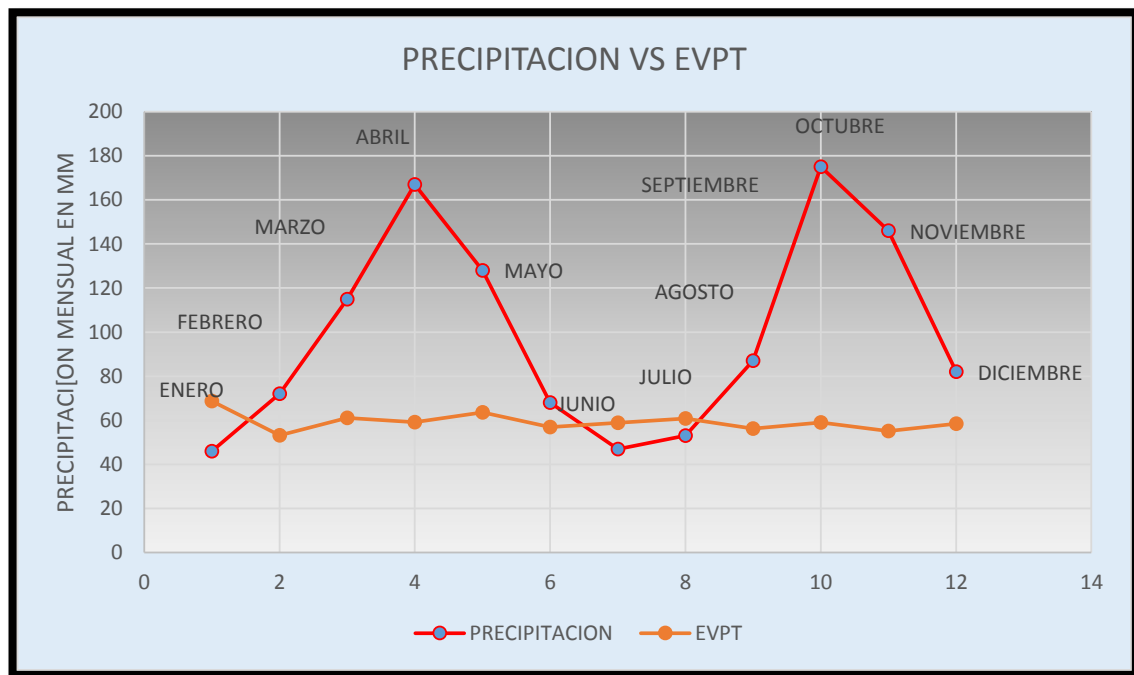
Dónde:

ETP: evapotranspiración en mm.

I: índice calórico, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales i , donde i es función de la temperatura media normal mensual $[i: (t/5)^{1,514}]$.

T: temperatura media mensual (no normal) en °C

a: exponente empírico, función de I $a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$.



MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
EVAPOTRANSPIRACION CALCULADA	68.7	53.1	61.2	59.1	63.6	56.9	58.9	60.9	56.3	59.1	55.2	58.4

Fuente: Los Autores

FIGURA 18. Precipitación VS Evapotranspiración.

Según la evapotranspiración calculada mediante la fórmula de Thornthwaite, (ver

FIGURA 18), se obtuvo la evapotranspiración media de cada mes, calculada tomando en cuenta la temperatura y el brillo solar, consiguiendo valores en parte homogéneos debido a la poca variabilidad de temperatura mes a mes, Además se observa claramente cómo en meses como enero, junio y julio la evapotranspiración calculada supera la pluviosidad promedio mensual, razonando que por este fenómeno serán meses con una recarga nula.

5.10 RECARGA POTENCIAL DEL ACUIFERO

La recarga al acuífero se lleva a cabo si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y satisfacer las demandas de evapotranspiración de las plantas. La cantidad de agua en exceso es la que recarga al acuífero calculándose mediante la siguiente ecuación, Usando la ecuación se procedió a calcular el mapa de infiltración potencial cada mes, para obtener el mapa de recarga potencial al acuífero.

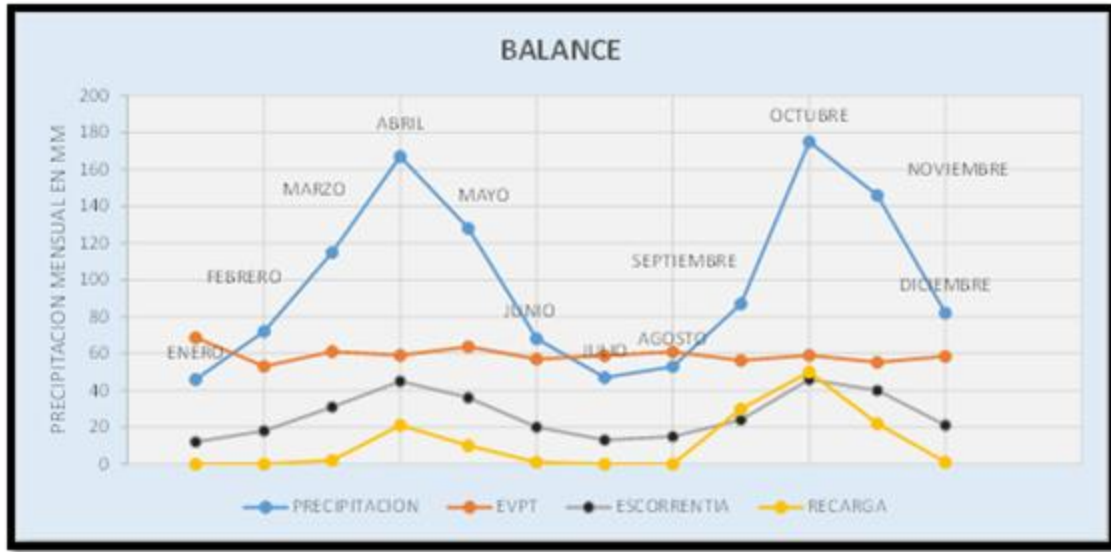
$$\mathbf{R_p = (P_i - ETR.)}$$

Donde:

R_p = Recarga potencial mensual en mm/mes

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

ETR = Evapotranspiración real en mm/ mes.



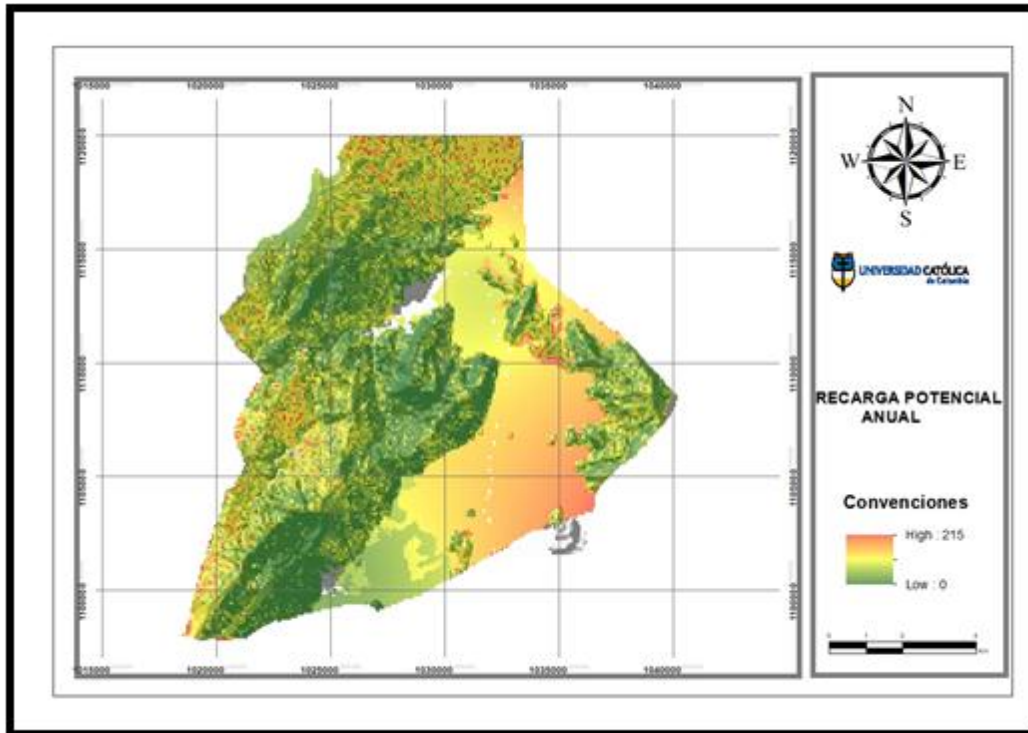
Fuente: Los Autores

FIGURA 19 Balance Hídrico Subsuperficial.

En la (FIGURA 19), se presentan los datos más relevantes para realizar el Balance Hidrico Subsuperficial, mostrando los datos de precipitación, evapotranspiración, escurrentia y recarga potencial, podemos inferir que los meses con mayor potencial de infiltración son Abril, Septiembre, Octubre y Noviembre. Existen 5 meses del año con un potencial de infiltración nulo, Enero, febrero, Junio y Julio y Agosto, además hay dos meses con un potencial muy bajo casi nulo, Marzo y Diciembre.

Las mayores Escurrentias se observan en los meses más lluviosos Abril y Octubre, mostrando esta curva una tendencia muy parecida a la de pluviosidad.

Existen tres meses al año donde la evapotranspiración calculada usando los datos de temperatura promedio y brillo solar superan el promedio de pluviosidad mensual, con altas posibilidades de llevar la humedad de los suelos a punto de marchitez, estos meses son: Enero, Julio y Agosto. Por esta simple apreciación podemos afirmar que no habrá infiltración o recarga potencial durante estos meses. En eventos de alta sequia en los meses de Febrero, Junio y Diciembre, puede llegar a suceder que la evapotranspiración supere la pluviosidad de la zona.



Fuente: Los Autores

FIGURA 20. Mapa recarga potencial anual

En el mapa de recarga potencial anual, (ver FIGURA 20), se exponen las zonas de mayor recarga presentes en el sinclinal de Chiquinquirá, obteniendo valores puntuales en algunas zonas de 215 mm/año, teniendo en cuenta las variables ya estudiadas, se confirma que la franja con mayor capacidad de recarga potencial es concordante con los sedimentos de edad Cuaternario, siendo este el acuífero por excelencia de la zona, lo sitios con alta pendiente presentan un potencial de recarga mucho más bajo, al combinar todas las variables, podemos ver que los datos obtenidos de K_p , tienen una alta relevancia a la hora de calcular el potencial de infiltración, coincidiendo estas áreas de bajas recargas con las zonas de mayor escorrentia.

Al realizar los calculos de volumen de agua que infiltra por formación obtuvimos que las areas por formación son:

Tabla 1 Área de las formaciones

Formación	Area km2	Area m2
Cuaternario	135.3	135300000
Frontera	6.03	6030000
Conejo	90.67	90670000
Simijaca	6.29	6290000
Chiquinquirá	60.45	60450000

Fuente: Los Autores

La tabla de agua que se infiltra promedio por formación es:

Tabla 2 Infiltración Anual

Formación	INFILTRACION m/año
Cuaternario	0.137
Frontera	0.137
Conejo	0.137
Simijaca	0.137
Chiquinquirá	0.137

Fuente: Los Autores

El volumen final de agua obtenido promedio por formación en un año es igual a:

Tabla 3 Volumen de recarga.

FORMACION	VOLUMEN DE RECARGA M3	VOLUMEN DE RECARGA KM3
Cuaternario	18536100	18.54
Frontera	826110	0.83
Conejo	12421790	12.42
Simijaca	861730	0.86
Chiquinquirá	8281650	8.28

Fuente: Los Autores

6 MODELO HIDRAULICO

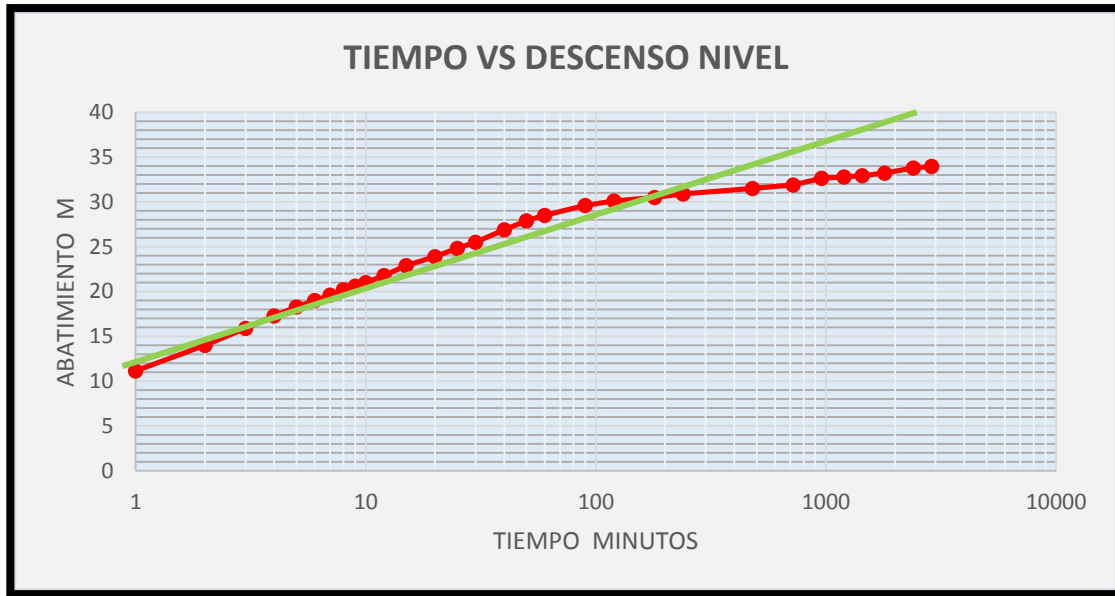
El modelo hidráulico tiene como fin conocer las propiedades hidráulicas del acuífero, estos parámetros se obtienen a partir de pruebas de bombeo realizadas a pozos en el área de estudio.

6.1 PRUEBAS DE BOMBEO

Una prueba de bombeo consiste en bombear un pozo que esté perforado en el acuífero que se desea estudiar durante cierto tiempo, a un determinado caudal para medir la evolución del nivel piezométrico debida al abatimiento, tanto en el mismo pozo de bombeo como en los piezómetros cercanos, si los hay. A partir del Comportamiento de los niveles de abatimiento, la distancia entre los pozos de observación, el pozo bombeado y el caudal de bombeo, se puede obtener información sobre las características del acuífero, como son: su conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento.

Para el presente proyecto solo fue posible adquirir los datos de un solo pozo, perforado a una profundidad de 400 metros por Empochiquinquirá en el sector norte de la Ciudad, al momento no existe pozo de monitoreo por tal razón no se puede determinar el coeficiente de almacenamiento.

Realizamos el análisis de esta prueba de bombeo usando el método de Jacob (1955), donde se grafica a escala semilogarítmica, FIGURA 21, el abatimiento contra el tiempo, obteniendo los valores de la transmisividad, usando la siguiente ecuación.



Fuente: Los Autores

FIGURA 21. Prueba de bombeo.

$$T = (0.183 \cdot Q) / (\Delta S)$$

Donde:

T: transmisividad se define como la cantidad de agua que circula a través de una sección vertical de un metro de anchura y de altura igual al espesor.

Q: Caudal al cual se realizó la prueba

ΔS : Pendiente de la línea que se obtuvo de la gráfica abatimiento vs tiempo.

$$T = (0.183 \cdot 454.46) / (11) = 7.56 \text{ m}^2/\text{día}$$

Conductividad

$$T = K \cdot b \text{ entonces } K = T/b$$

Donde:

K: Conductividad

T: Transmisividad

b: Espesor del acuífero, para este caso se tomó la longitud de todos los filtros.

$$K=7.56 / 87= 0.087 \text{ m/día}$$

Según el documento Comisión Nacional del Agua (2007), el valor de este la conductividad corresponde a Areniscas de grano fino.

Para los pozos ubicados sobre los depósitos cuaternarios, no fue posible adquirir información de las pruebas de bombeo, por esta razón presentamos valores teóricos presentados en el ENA (2014).

T: 20 a 130 m²/día.

K= 2 m/día

S= 2.5x10⁻⁴

Tabla 4 Propiedades Hidráulicas

FORMACION	TRANSMISIVIDAD T(m ² /día)	CONDUCTIVIDAD K(m/día)	COEFICIENTE ALMACENAMIENTO
CONEJO	7.56	0.087	—
CUATERNARIO	20- 130	2	2,5x10 ⁻⁴

Fuente: Los Autores

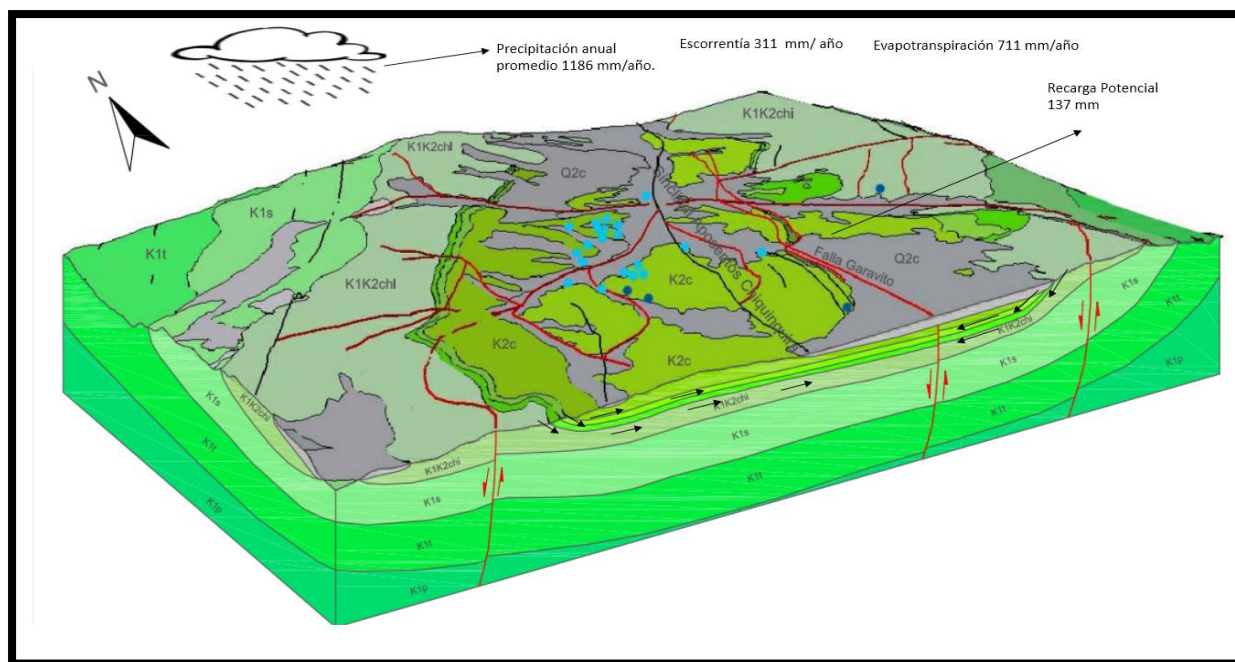
7 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

El modelo hidrogeológico conceptual es una simplificación esquemática de la naturaleza, en la que se busca describir el funcionamiento y características del sistema hidrogeológico.

El Municipio de Chiquinquirá está ubicado dentro de una gran estructura geológica regional llamada Sinclinorio de Chiquinquirá, dentro de este bloque se reconocen pliegues asimétricos estrechos y fallas con orientación general N300E. Las estructuras presentes en este son: el Sinclinal de Aposentos – Chiquinquirá, la Falla de Carupa, La Falla de Aposentos, El anticlinal de Caldas, El Sinclinal de Caldas, esto lo podemos observar en la FIGURA 23.

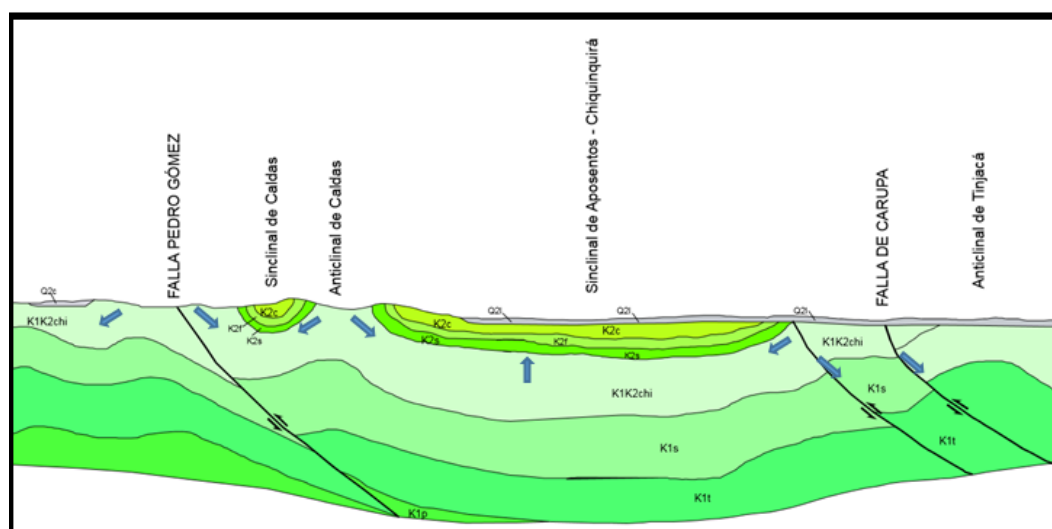
En esta estructura encontramos rocas de edad cretácica como la formación Chiquinquirá que presenta porosidad primaria, se considera acuífero libre en los sectores donde aflora en superficie y confinado hacia el eje del sinclinal La formación Frontera, Simijaca y Conejo presentan porosidad secundaria y porosidad primaria en los niveles arenosos, estas formaciones debido a sus características se consideran acuitardos y acuíferos en los niveles arenosos. Los depósitos Cuaternarios presentan porosidad primaria y se clasifican como acuíferos libres.

En la FIGURA 22 se graficaron las direcciones de flujo del agua de escorrentía, estas se coligieron por las condiciones morfológicas y topográficas; las direcciones de flujo del agua subterránea se infirieron por la dirección del buzamiento de las rocas ya que por falta de datos no fue posible trazar líneas equipotenciales ni direcciones de flujo; Por la diferencia de niveles piezométricos probablemente el agua presente en la formación Conejo puede recargar el acuífero de los depósitos Cuaternarios, para poder corroborar esto se deben hacer pruebas hidrogeoquímicas en los pozos ubicados sobre los depósitos para evaluar la conductividad y el porcentaje de calcio. Los datos de evapotranspiración, escorrentía, infiltración y recarga potencial se muestran en la figura, mostrando mayor potencial de recarga los depósitos del Cuaternario por presentar pendientes planas y suelos de textura franco arenosa, y la formación Chiquinquirá por presentar suelos de textura arenosa.



Fuente: Los Autores

FIGURA 22. Modelo Hidrogeológico Conceptual



Fuente: Servicio Geológico Colombiano

FIGURA 23. Perfil Geológico.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- La zona de realización del Modelo Hidrogeológico Conceptual se delimitó siguiendo las características Geológicas del Sinclinal de Aposentos-Chiquinquirá siendo la estructura geológica determinante para la recarga y acumulación de agua en las rocas.
- La recarga potencial anual de la zona es de aproximadamente 40.92 Kilómetros cúbicos de agua, siendo las formaciones, Chiquinquirá y los depósitos Cuaternarios los que tienen mayor potencial de infiltración. Los depósitos Cuaternarios tienen el mayor potencial de infiltración llegando a ser de 18.54 Kilómetros cúbicos al año.
- Las zona de mayor infiltración coincide con una pendiente baja, una cobertura vegetal de cultivos, y suelos franco arcillosos, esta zona tiene un menor potencial de escorrentía, quedando en el núcleo del sinclinal, mostrando condiciones favorables para la infiltración y acumulación de agua.
- La pluviosidad de la zona en la parte céntrica del sinclinal, o la zona cercana a la población de Chiquinquirá es la que presenta menor pluviosidad durante todo el año, las partes altas hacia la zona nor-occidental muestran un régimen más favorable de pluviosidad, justo en la zona de afloramiento de las areniscas de Chiquinquirá, siendo este un acuífero confinado de mejores características geológicas para la acumulación del recurso hídrico, pudiendo producir un caudal mucho más alto que las formaciones productoras actuales, se recomienda realizar un estudio más a detalle para prospectar y extraer agua de esta formación.
- Las bajas precipitaciones anuales traen como consecuencia bajas recargas de los acuíferos, la litología presente en los alrededores influyen para que las reservas de agua

subterránea sean bajas, por tal motivo se debe realizar un control en los permisos y caudales de extracción de este recurso.

- La textura del suelo en cercanías al centro poblado y los cultivos, hacen que los depósitos Cuaternarios sean más vulnerables a la contaminación por aguas residuales, pesticidas, materia fecal humana y de ganadería, es importante periódicamente monitorear la calidad de las aguas subterráneas en estos acuíferos.
- La formación Conejo se clasifica como acuífero confinado en los niveles arenosos, en los niveles de arcillolita y limolita se clasifica como acuitardo, aunque estas capas pueden presentar porosidad secundaria, por diferencias piezométricas puede haber una intercomunicación entre el acuífero de la formación Conejo y el acuífero de los depósitos cuaternario a través de las fracturas, con un análisis del contenido de Calcio presente en las aguas de los depósitos cuaternarios se podría corroborar esta inferencia.

-

8 BIBLIOGRAFÍA

CAR & CONSORCIO ALTO SUAREZ. (2015).

CAR & CONSORCIO ALTO SUAREZ. (18 de Agosto de 2015). Desarrollar La Consultoría Para La Elaboración De Los Estudios Consistentes En Componente 1: Prospección Geofísica Para Definir Acuíferos Y Basamentos En La Cuenca Alto Suarez Componente 2: Obtener Parámetros Para Realizar Modelos De La Infiltración. Chiquinquirá, Boyacá, Colombia.

CAR & GEOSING S.A.S. (2014). Modelación de formaciones geológicas prioritarias que constituyen acuíferos y diseño de la red de monitoreo de niveles piezométricos y calidad de agua subterránea en la cuenca del río alto Suarez. Chiquinquirá, Boyaca, Colombia.

CAR. (2005). Elaboración De Los Estudios De Diagnostico Prospectiva Y Formulación Para La Cuenca Hidrográfica De Los Ríos Ubaté Y Suárez. Bogotá, Colombia.

Castany, G. (1975). *Prospección y explotación de aguas subterráneas*. Barcelona: Omega S:A:.

Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de agua Potable, alcantarillado y Saneamiento*. Mexico.

Custodio, L. Y. (1983). *Hidrologia Subterranea*. Barcelona: Omega S.A.

Eltiempo.com. (08 de 2016). <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/chiquinquirá-sufre-por-agua-46655>.

Gómez, J. C. (2009). Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica E Isótopos, Como Herramientas Para Definir Un Modelo Conceptual Hidrogeológico, Caso De Aplicación: Acuífero Costero Del Municipio De Turbo. (U. Nacional, Ed.) Medellin.

IDEAM. (2015). Estudio Nacional Del Agua 2014. Bogotá, Colombia.

Osorio, M. J. (2015). Construcción de modelos hidrogeológicos en medios fracturados a partir de información escasa. Medellín, Colombia: Universidad Nacional .

RCN RADIO. (02 de 2016). <http://www.rcnradio.com/locales/mas-80-mil-personas-afrontan-escasez-agua-chiquinquirá/>.

Schosinsky, G. (2007). *Calculo de Recarga Potencial de Acuíferos Mediante Balance Hidrico de Suelos*. Costa Rica: Escuela Centroamericana de Geología.

Secretaría de desarrollo y bienestar social. (2013). Análisis de Situación de Salud con el Modelo de los Determinantes Sociales de Salud 2013. (A. d. Chiquinquirá, Ed.) Chiquinquirá, Boyacá, Colombia.

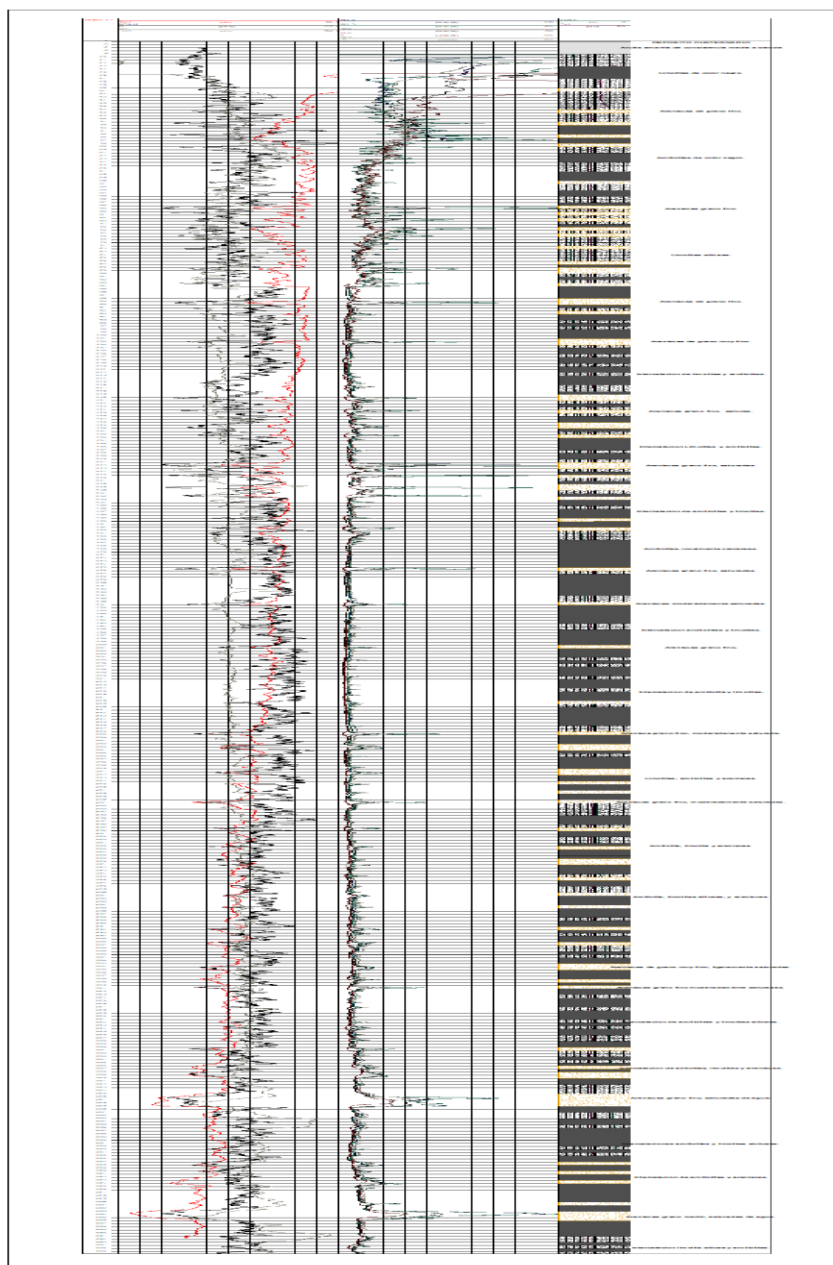
Servicio De Evaluación Ambiental, SEA. (2012). *Guia Para El Uso De Modelos De Aguas Subterrneas En El SEIA*. Chile: Servicio De Evaluacion Ambiental, SEA.

Velez, M. V. (1999). Hidráulica de aguas subterrneas. Medellin, Antioquia, Colombia.

Veloza, J. A. (2013). Sistema de modelamiento hidrogeológico del distrito Capital. BOGOTA D.C, BOGOTA, COLOMBIA.

APÉNDICES

Apéndice A: Registros eléctricos tomados en el pozo perforado en el sector Norte, Chiquinquirá.



Apéndice B: Datos prueba de bombeo pozo sector Norte Chiquinquirá.

BOMBEO			RECUPERACION		
Tiempo (min)	Nivel del agua (m)	Abatimiento (m)	Tiempo (min)	Nivel del agua (m)	Abatimiento (m)
0	4.7	20.3	0	33.94	0
1	11.15	6.5	1	26	7.94
2	14	9.3	2	22.47	11.47
3	15.9	11.2	3	19.45	14.49
4	17.3	12.6	4	17.35	16.59
5	18.3	13.6	5	15.5	18.44
6	19	14.3	6	14.45	19.49
7	19.6	14.9	7	13.57	20.3
8	20.2	15.5	8	12.9	21.04
9	20.6	15.9	9	12.35	21.59
10	21	16.3	10	11.88	22.06
12	21.8	17.1	12	11.16	22.78
15	22.9	18.2	15	10.57	23.37
20	23.9	19.2	20	10.05	23.89
25	24.8	20.1	25	9.8	24.14
30	25.5	20.8	30	9.45	24.49
40	26.9	22.2	40	9.3	24.64
50	27.9	23.2	50	9.06	24.88
60	28.5	23.8	60	8.87	25.07
90	29.6	24.9	90	8.47	25.47
120	30.1	25.4	120	8.15	25.79
180	30.5	25.8	180	7.65	26.29
240	30.9	26.2	240	7.28	26.66
480	31.5	26.8	480	6.44	27.5
720	31.9	27.2	720	6	27.94
960	32.64	27.9	960	5.72	28.22
1200	32.78	28.1	1200	5.47	28.47
1440	32.9	28.2	1440	5.35	28.59
1800	33.19	28.5	1800	5.7	28.77
2400	33.78	29.1	2400		
2880	33.94	29.4	2880		

Apéndice C: Inventario puntos de agua.

TIPO	X	Y	COTA	TIPO	X	Y	PROFUNDIDAD
MANANTIAL	1027410	1112196	2595	POZO	1027070	1108997	60
MANANTIAL	1029859	1114272	2570	POZO	1026986	1109708	95
MANANTIAL	1032086	1116083	2560	POZO	1030280	1106069	60
MANANTIAL	1026769	1110415	2580	POZO	1034341	1080264	50
MANANTIAL	1030138	1111718	2570	POZO	1038519	1081981	300
MANANTIAL	1031478	1110323	2590	POZO	1028356	1028356	80
MANANTIAL	1029889	1114849	2600	POZO	1030732	1096423	80
MANANTIAL	1029440	1114677	2600	POZO	1032666	1073232	80
MANANTIAL	1029157	1114179	2570	POZO	1030203	1078710	140
MANANTIAL	1029302	1114101	2510	POZO	1028018	1074740	60
MANANTIAL	1028418	1114399	2710	POZO	1035519	1091396	165
MANANTIAL	1028869	1113538	2575	POZO	1033632	1074926	130
MANANTIAL	1027670	1112860	2590	POZO	1034740	1077706	150
MANANTIAL	1028125	1113068	2650	POZO	1040050	1090168	150
MANANTIAL	1028327	1111187	2590	POZO	1030297	1081366	300
MANANTIAL	1028042	1110557	2610	POZO	1032556	1073903	152
MANANTIAL	1027805	1110647	2600	POZO	1031073	1080418	170
MANANTIAL	1027836	1111033	2590	POZO	1031006	1080470	152
MANANTIAL	1027396	1112217	2590	POZO	1021514	1064713	150
MANANTIAL	1026328	1111156	2580	POZO	1034229	1083089	200
MANANTIAL	1029357	1113533	2555	POZO	1034394	1089553	70
				POZO	1037688	1112442	87
				POZO	1111480	1027260	135
				POZO	1111730	1027650	100
				POZO	1030041	1114035	400
				POZO	1111480	1027260	135

ANEXOS